



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports

UPC BARCELONATECH

Estudio de la respuesta de un terraplén bajo acciones climáticas.

Treball realitzat per:

Sayoa Oscoz Pérez

Dirigit per:

Jean Vaunat

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, 23 de Junio, 2016

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental (ECA)

TREBALL FINAL DE GRAU

Resumen

En países del Norte como Inglaterra existen kilómetros de diques de protección frente a inundaciones. Durante la construcción de uno de estos diques en Galston (Escocia) se realizó un experimento en un laboratorio, dentro de una cámara ambiental, debidamente instrumentado para analizar el comportamiento de la estructura frente a los ciclos de humectación y secado al que se le sometió. Durante este experimento se tomaron medidas de succión, temperatura y contenido de agua en diferentes puntos del terraplén a diferentes profundidades.

Partiendo de este experimento se ha buscado implementar un modelo acoplado termo-hidráulico con Code Bright que nos permite estudiar la respuesta hídrica del terraplén ante la variación de diferentes parámetros atmosféricos y del suelo, con el fin último de poder, en un futuro, ajustar un modelo que nos permita prever cómo reaccionaría la estructura diferentes condiciones atmosféricas.

Para ello se analiza la respuesta del modelo ante variaciones de la radiación, permeabilidad, calor específico y la curva de retención del suelo. Se puede concluir que la evaporación del agua la controla la radiación mientras que la infiltración del agua en el suelo viene controlada por la permeabilidad. El calor específico del suelo tiene muy poca repercusión. La conclusión más importante es que la ley que controla en mayor medida el proceso es la curva de retención, que ajustándola debidamente nos permite conocer perfectamente la reacción del suelo (succión) ante los cambios de humedad. Por ello es importante que la curva se realice con medidas in situ en el terraplén real y no mediante ensayos de laboratorio.

Índice

Capítulo 1: Introducción	5
1.1 Objetivo y aplicaciones	5
1.2 Organización del trabajo final de grado	6
Capítulo 2: Descripción del experimento	7
2.1 Introducción	7
2.2 Propiedades del suelo	7
2.2.1 Caracterización del suelo	7
2.2.2 Estructura del suelo	9
2.2.3 Curva de retención del material	10
2.3 Modelo del terraplén	11
2.4 Experimentos en la cámara ambiental	12
2.4.1 Descripción de la cámara ambiental	12
2.4.2 Retención de agua en el terraplén durante los ciclos de humectación	13
2.5. Resultados	14
2.6 Conclusiones	15
Capítulo 3: Modelación numérica (Code Bright)	16
3.1 Code Bright	16
3.2 Formulación Matemática	16
3.2.1 Ecuaciones de Gobierno	17
3.2.1.1 Ecuaciones de Balance	17
3.2.1.2 Ecuaciones constitutivas	19
3.2.1.3 Condiciones de equilibrio	21
3.2.1.4 Condiciones de contorno	21
Capítulo 4: Modelación del terraplén	24
4.1 Introducción	24
4.2 Modelación del terraplén	24
4.3 Condiciones de contorno	25
4.4. Condiciones iniciales	27
4.5 Material	29
4.5.1 Datos térmico e hidráulicos del material	29
4.5.2 Propiedades de las fases	30
4.6 Datos de intervalo	30
4.7 Malla de elementos finitos	30
4.8 Datos atmosféricos	31
4.8.1 Radiación	31
4.8.2 Viento	31
4.8.3 Precipitación	32
4.8.4 Datos de humedad relativa y temperatura ambiente	32

4.8.5 Nubosidad-----	32
4.9 Parámetros de estudio-----	32
4.9.1 Difusividad del vapor -----	33
4.9.2 Permeabilidad -----	33
4.9.3 Conductividad térmica -----	33
4.9.4 Calor específico-----	33
4.9.5 Curva de retención -----	34
Capítulo 5: Análisis de los resultados-----	36
5.1 Conductividad térmica -----	36
5.2 Permeabilidad -----	38
5.3 Curva de retención -----	40
5.4. Radiación-----	42
5.5. Ajuste del modelo-----	46
Capítulo 6: Conclusiones-----	48
Bibliografía-----	49
Anejos-----	51
Anejo 0. Casos de estudio-----	52
Anejo 1. Resultados caso 1-----	53
Anejo 2. Resultados caso 2-----	56
Anejo 3. Resultados caso 3-----	59
Anejo 4. Resultados caso 4-----	62
Anejo 5. Resultados caso 5-----	65
Anejo 6. Resultados caso 6-----	68
Anejo 7. Resultados caso 7-----	71
Anejo 8. Resultados caso 8-----	74
Anejo 9. Resultados caso 9-----	77

1. Capítulo 1. Introducción

1.1 Objetivo y aplicaciones.

En el campo de la Ingeniería Civil interesa cada vez más la interacción de las obras con el terreno y con la atmósfera. Éste interés se debe a que pueden generar problemas importantes como las deformaciones térmicas, que también pueden afectar a otras estructuras, como por ejemplo las pantallas de hormigón. Es interesante también estudiar la respuesta del suelo durante una sequía, ya que ocasionará una retracción que puede crear asentamientos diferenciales en las edificaciones colindantes, igual que la vegetación, cuyo efecto a veces no se considera y también puede dar lugar a grandes deformaciones que afectan a las estructuras.

Nos encontramos también un problema cada vez más actual y en boca de todos: el cambio climático. Con él, las precipitaciones van a ser más abundantes, pero más concentradas, es decir, lloverá más en menos tiempo. Esto puede afectar a las diferentes estructuras de tierra, como pueden ser presas, diques o terraplenes, ya que un aumento rápido del contenido de agua por un suceso de lluvia generaría una disminución de succión pudiendo comprometer la estabilidad de la estructura. Además, en estructuras cercanas a la costa se tendría que considerar también el aumento del nivel del mar por este calentamiento global.

En países con mucha costa, como es el caso de Inglaterra, tienen construidos kilómetros de diques de contención de agua que luchan contra las inundaciones por el mar. En estos diques de la costa se debería estudiar la respuesta a cambios de humedad tanto por acción de las lluvias más concentradas como por el mojado de pie por el aumento del nivel del mar.

En este trabajo se analizan los cambios hídricos en este tipo de geoestructuras mediante un modelo acoplado termo-hidráulico basándonos en los datos proporcionados por un experimento realizado en Escocia sobre un terraplén a escala construido en una cámara ambiental en el laboratorio. Se pretende conseguir una relación entre los diferentes parámetros climáticos y la respuesta de la estructura con el fin de poder realizar en un futuro un modelo que nos permita prever su comportamiento más adelante.

1.2 Organización del trabajo final de grado

- **Capítulo 1. Introducción**
- **Capítulo 2. Descripción del experimento.** En este capítulo se detallan los aspectos más importantes, métodos utilizados y resultados obtenidos en el experimento realizado en un laboratorio en la que se realizó un modelo a escala dentro de una cámara ambiental de un terraplén real que se estaba construyendo en Escocia en ese momento. Se le sometió a diferentes condiciones climáticas, obteniendo medidas de succión y temperatura en diferentes puntos durante un periodo de 20 días.
- **Capítulo 3. Modelación numérica con Code Bright.** En este apartado se explican las bases matemáticas utilizadas por el software Code Bright que se ha utilizado para realizar un modelo acoplado termo-hidráulico para estudiar la variación de la respuesta hídrica de la estructura.
- **Capítulo 4. Modelación del terraplén a escala.** Aquí se explica los pasos seguidos a la hora de implementar el modelo: la geometría del modelo, las propiedades del material consideradas, las condiciones iniciales y de contorno utilizadas y los parámetros que se han considerado más representativos para estudiar estas variaciones de respuesta.
- **Capítulo 5. Análisis de los resultados.** Una vez realizados los cálculos, se analizan y comparan los resultados, parámetro por parámetro viendo como varía tanto la succión como la temperatura con ellos. Finalmente se presenta el caso más ajustado a los datos que tenemos del experimento medidos en el laboratorio.
- **Capítulo 6. Conclusiones.** Finalmente se analizan los resultados y se extraen tanto conclusiones del análisis como posibles mejoras y futuras aplicaciones.

Capítulo 2. Descripción del experimento

2.1 Introducción.

Este trabajo se fundamenta en un experimento realizado en la Universidad de Strathclyde, en Glasgow, UK. En él se estudió el comportamiento de un dique de protección contra inundaciones construido a escala dentro de una cámara ambiental con condiciones controladas, con el fin de reproducir las condiciones de los diques que estaban siendo construidos en Galston (Scotland) en ese momento. La cámara ambiental contenía un modelo a escala del terraplén debidamente instrumentado.

Este estudio se centró principalmente en la retención de agua del dique cuando era sometido a ciclos de humectación y secado. La información obtenida del estudio a escala se complementó con la curva de retención del material obtenida en el laboratorio con muestras compactadas utilizando 3 métodos diferentes: psicrómetros de alto rango, papel de filtro e intrusiones de mercurio.

2.2 Propiedades del suelo

2.2.1 Caracterización del suelo

El material utilizado se denomina arcilla Galston y se categoriza como arcilla de plasticidad intermedia. En la figura 1 podemos ver la curva granulométrica del suelo obtenida en el laboratorio, formado principalmente por arenas y limos, y en la tabla 1 se recogen las propiedades más relevantes del material.

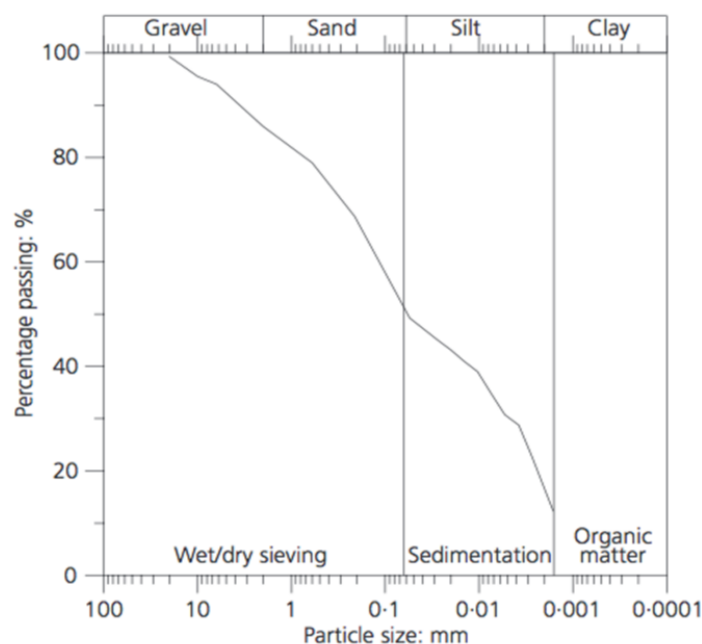


Figura 1. Distribución granulométrica de la arcilla Galston

Soil property	Value
Natural moisture content: %	17.9*
Shrinkage limit: %	10*
Liquid limit: %	36*
Plastic limit: %	16*
Plasticity index, I_p : %	19*
Optimum moisture content, OMC: %	11.5
Maximum dry density, ρ_d : Mg/m ³	1.95
Particle density (<2 mm), ρ_s : Mg/m ³	2.66*
Particle density (>2 mm) ρ_s : Mg/m ³	2.77*
On-site undrained shear strength, c_u : kN/m ²	138†
Estimated suction of natural soil: kPa	100

* Average from three independent tests.

† Average from four independent tests.

Tabla 1. Propiedades de la arcilla Galston

Se realizaron también análisis de la composición, que verificaron la no presencia de materiales de arcilla activos y se completó la información con medidas in situ de la resistencia al corte no drenada, cuyos resultados se aprecian en la tabla 1 y que permitieron calificar el suelo como una arcilla rígida.

Finalmente se realizó un test de compactación de acuerdo con el “British Standard method (BS 1377-4, BSI, 1995b). Los resultados se ven en la figura 2 donde se representa la relación entre la densidad seca y el contenido de agua. La densidad seca máxima se estableció en 1.95 Mg/m³ y el contenido óptimo de agua en 11.5%.

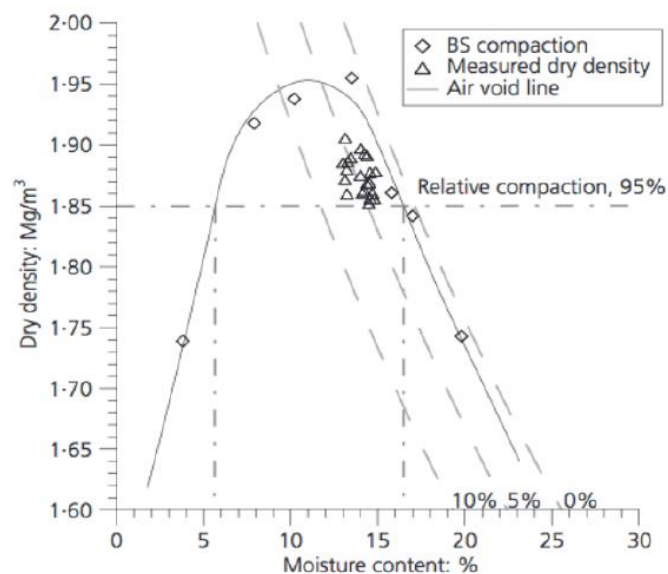


Figura 3. Test de compactación. Relación Densidad seca- Contenido de agua

2.2.2 Estructura del suelo

Para determinar el espacio de poros y la distribución de los tamaños de poros del material compactado cerca del contenido de agua óptimo (91% de grado de saturación), se llevó a cabo un MIP test en la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) con la ayuda de un porosímetro AutoPore IV 9500. El ensayo determina la presión absoluta que se aplica a una cantidad de mercurio para que penetre en los poros vacíos.

Los resultados obtenidos mostraron un índice de poros máximo de 0.47 donde se introdujo el mercurio, comparado con el 0.61 de la muestra compactada. Esto se debe a los poros menores de 7nm, donde el mercurio no puede entrar y a los poros mayores a 400µm que no son detectados. Se realizó después el proceso inverso de extrusión del mercurio, donde se observó que parte del líquido quedaba atrapado en los poros restringidos. Según **Delage and lefebre (1984)**, la porosidad intra-agregada corresponde a una porosidad no restringida, mientras que los poros grandes inter-agregados se corresponden con la porosidad restringida.

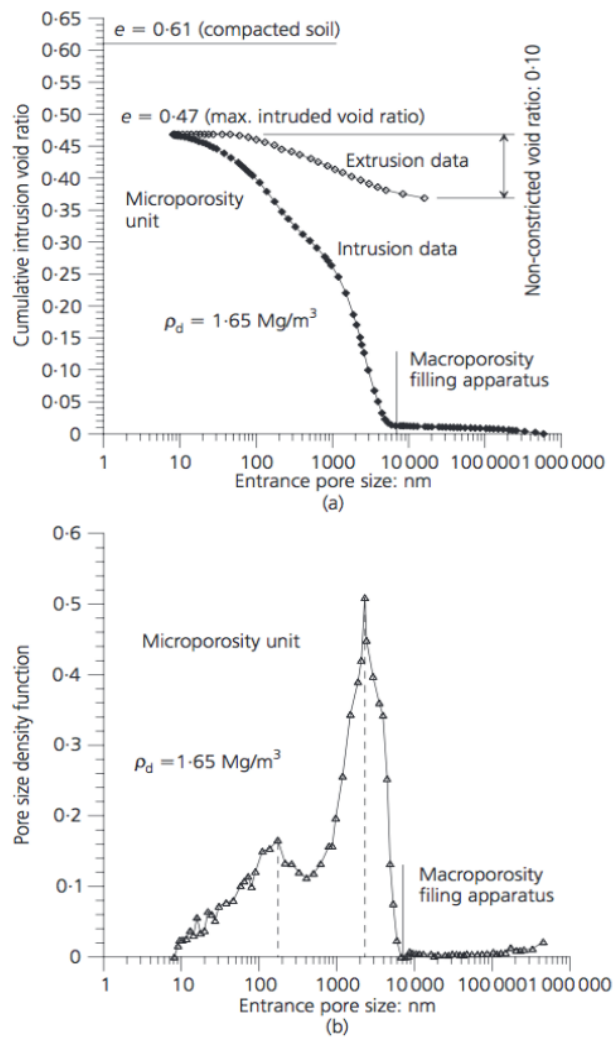


Figura 3. Arriba, intrusión de porosidad acumulada. Abajo, distribución de poros

En la figura 3 se puede apreciar como la porosidad reversible representa sólo un 21% del índice de poros total. Además, observamos que se distinguen dos modos, un pico dominante que representa la porosidad inter-agragada (2.1µm) y otro secundario que corresponde con la porosidad intra-agragada (0.9µm).

2.2.3 Curva de retención del material

La succión total se puede dividir en dos componentes: la succión matricial y la succión osmótica. Ésta última se debe al contenido de sal en el agua de los poros y se produce tanto en suelos saturados como no saturados. Sin embargo, es muy pequeña comparada con la succión matricial, por lo que generalmente se desprecia. De esta forma definimos la succión como la diferencia entre la presión de aire y la presión de agua:

$$s_m = p_a - p_w$$

Para determinar la retención de agua se utilizan diferentes técnicas dependiendo del nivel de succión. Así, para este estudio se utilizaron tres técnicas diferentes:

1. Papel de filtro, que mide la succión matricial en rangos bajos de hasta 2MPa.
2. Psicrómetros de alto rango para medir la succión total en rangos entre 2MPa y 100MPa.
3. Curva de retención derivada de los resultados del MIP, que cubre los rango de succión más bajos

Los resultados de la curva de retención los podemos observar a continuación:

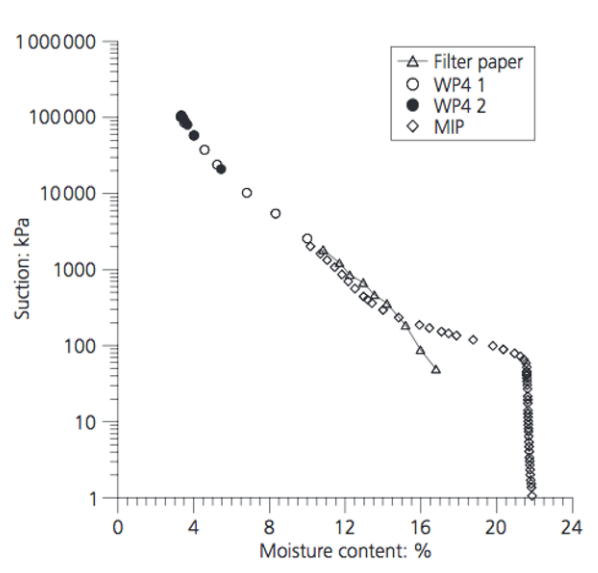


Figura 4. Curva de retención de agua medida mediante los 3 métodos.

2.3 Modelo del terraplén

Para la construcción del modelo en el laboratorio se utilizó el mismo material que se estaba utilizando para la construcción del terraplén real y cuyas características hemos descrito anteriormente.

La geometría del terraplén es de una coronación de 1m x 1m, con pendientes de 1:2 a cada lado y una berma de 0.2 metros de alto y 2 metros de longitud. El ancho se estableció en una rebanada de 1 metro, suficientemente representativo.

Para la construcción se redujeron los grumos del material. Se realizaron 10 capas de 0.1 metros cada una para obtener el nivel de homogeneidad deseado, así como la densidad alcanzada en los ensayos de laboratorio.

Se obtuvo una compactación del 95% cuyo control se llevó a cabo siguiendo la normativa inglesa "*Specification for Highway Works: Earthworks, Series 6000 (Highways Agency, 2006)*" mediante un plato vibrador de 85 kg. Entre dos capas compactadas se utilizó un rastrillo para conseguir un mejor contacto.



(a)



(b)

Figura 5. Modelo del terraplén. Arriba durante su construcción. Abajo, instrumentado

El control de la humedad se realizó periódicamente durante la compactación de forma que no variara fuera del rango del 5.5% y el 16.5%, como podemos observar en la figura 2. Además, se tomaron muestras de suelo no perturbadas de ambos lados del terraplén de las que se midieron la densidad y la humedad. Los resultados son apreciables en la figura 2. Por último, se realizaron ensayos para la resistencia al corte no drenado (Vane test) que mostró resultados entre 64 y 96 kPa con una humedad entre 13% y 14.9%. Estos resultados son menores que los obtenidos en laboratorio (138 kPa), lo que se atribuye a una pérdida de cohesión o una posible desestructuración durante la compactación.

2.4 Experimentos en la cámara ambiental

2.4.1 Descripción de la cámara ambiental

Para estudiar la interacción entre las condiciones ambientales y las respuestas de las diferentes variables del material y para ver la relación entre estos cambios y la estabilidad del terraplén, se colocó el modelo a escala dentro de una cámara ambiental para someterla a diferentes condiciones controladas de humedad, temperatura, radiación, etc.

Se construyó un marco de madera de 1 metro de alto, 8 metros de largo y 1.85 metros de ancho. A ambos lados de la cámara se colocaron dos puertas que permitían la ventilación. La lluvia se simuló mediante aspersores colocados 1 metro sobre la coronación del terraplén. Además, seis calentadores infrarrojos de 1.2kW cada uno y dos ventiladores se activaban dependiendo de la temperatura registrada por un termostato, de forma que la temperatura interna estaba controlada en cada momento. Las condiciones ambientales se controlaban usando sensores de temperatura y humedad relativa y tres cámaras permitían una observación visual constante.

Para medir los parámetros del suelo el terraplén se instrumentó con sensores ThetraProbe para medir el contenido de agua y tensiómetros para medir la succión matricial y la temperatura. Se colocaron 8 tensiómetros y 4 ThetraProbe en puntos diferentes a profundidades de 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8 metros.

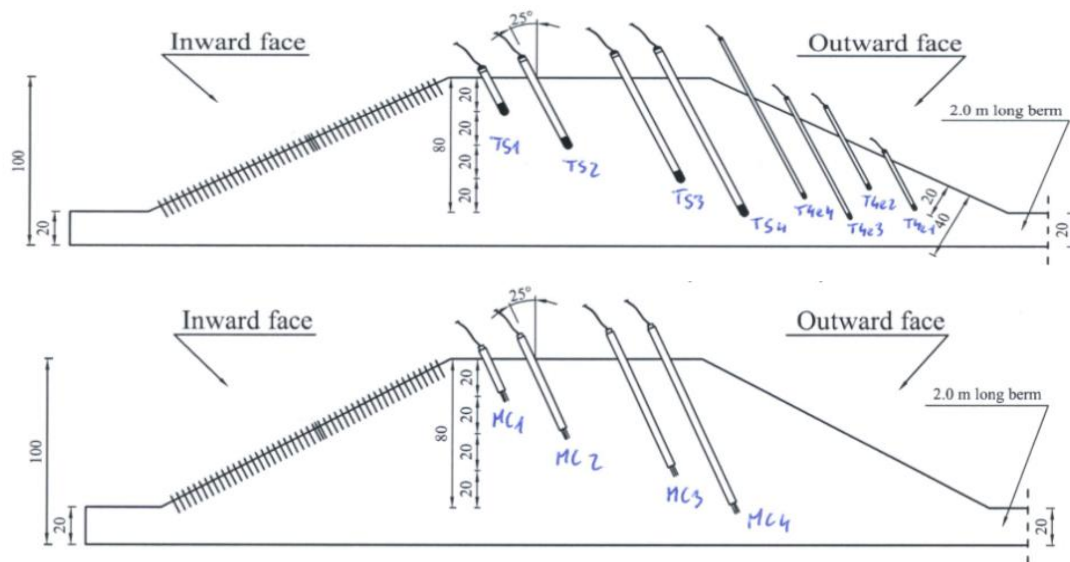


Figura 6. Alzado de la instrumentación del terraplén. Arriba, posición de los tensiómetros. Abajo, posición de las sondas ThetraProbe.

2.4.2 Retención de agua en el terraplén durante los ciclos de humectación-secado

Nos centramos ahora en el análisis de los datos recogidos de la retención de agua durante el secado del terraplén tras someterlo a periodos de lluvia controlados. La evolución del contenido de agua y succión medidos con los tensiómetros y los ThetraProbe colocados a 0.2 metros de profundidad, durante los 20 días que duró el experimento, la podemos observar en la figura 6.

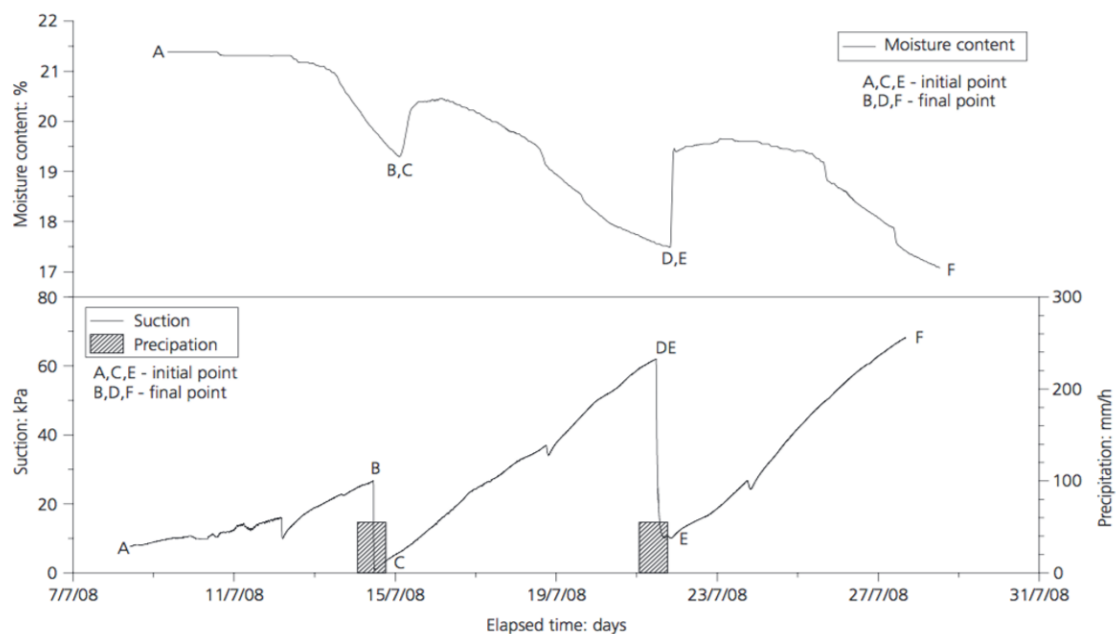


Figura 7. Variación de la succión y el contenido de agua durante el experimento

Tras la construcción, se humedeció la estructura y se tapó para mantener la humedad. El punto A corresponde con el inicio del experimento, con un contenido de agua del 21.5% y una succión de 8 kPa. Se dejó secar el terraplén durante 1 semana, en la que se llegó a una succión de 29 kPa con un contenido de agua de 19% (punto B). En ese momento se pusieron en marcha los aspersores durante 16 horas con una intensidad de precipitación de 55 mm/h, correspondiendo con la precipitación media de Reino Unido (Punto C). Se volvió a dejar secar durante una semana (Punto D), activando de nuevo los aspersores 16 horas con el mismo ratio de precipitación (Punto E). Finalmente se dejó secar, acabando en el punto F.

El hecho de tener los tensiómetros y los sensores ThetraProbe a las mismas profundidades y en los mismos puntos permitió dibujar la curva de retención de agua para los tres ciclos de secado a los que se vió sometido la estructura. En la figura 7 vemos los resultados para la profundidad de 0.2 metros (TS1, MC1). En la figura 8 se observa la comparación de las curvas de retención durante el secado y la obtenida en el laboratorio mediante las tres técnicas explicadas anteriormente.

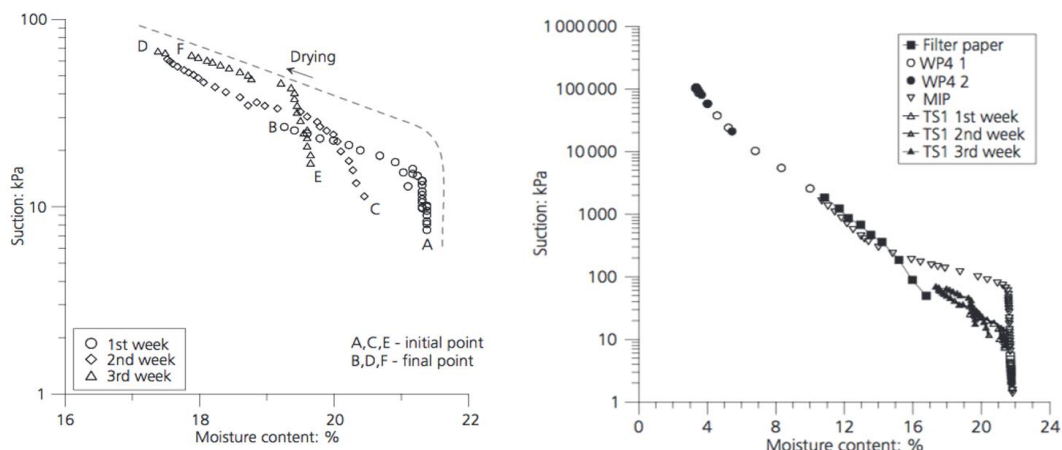


Figura 8. Derecha, Curva de retención de agua durante los ciclos de humectación-secado. Izquierda, curva de retención obtenida en el laboratorio y en el terraplén.

2.5 Resultados

- Las muestras de laboratorio utilizadas para dibujar la curva de retención del material descrita en el apartado 2 tenía una densidad mayor que la del modelo del terraplén instrumentado, lo que hace esperar que en éste último la succión sea algo menor. Al margen de esto se pueden comparar ambas curvas.
- Se puede concluir que los tres caminos de secado siguen una tendencia conjunta.
- El camino AB muestra los valores mayores de contenido de agua al inicio que coinciden con los valores obtenidos en el ensayo MIP, y los valores más bajos de

entrada de aire, esto se asocia a un hinchamiento durante la humectación previa del terraplén.

- El siguiente ciclo de secado (CD) presenta menor contenido de agua en el inicio y un valor mayor de la entrada de aire al final, lo que se atribuye a una contracción del material durante los ciclos.
- Por el mismo motivo el último ciclo (EF) presenta el valor más bajo de contenido de agua al inicio y el mayor valor de entrada de aire al final.
- Las tres curvas evolucionan hacia la curva obtenida por método del papel de filtro, y van siempre por debajo de la curva obtenida con el ensayo MIP.

2.6 Conclusiones

La observación más representativa de este experimento fue la reducción progresiva de la capacidad de almacenamiento de agua y el incremento de la entrada de aire debido a una contracción acumulativa del suelo a lo largo de los ciclos hidráulicos.

Podemos concluir unos buenos resultados al comparar las curvas de retención obtenidas en el laboratorio y en el modelo físico del terraplén, donde los ciclos de secado evolucionan hacia la curva de secado obtenida con el papel de filtro. Esto nos sugiere que se puedan realizar medidas in situ en modelos ensayados en condiciones controladas para la realización de la curva de retención de agua.

Capítulo 3. Modelación numérica (Code Bright)

Para conseguir un modelo que permita estudiar cómo afectan las diferentes condiciones atmosféricas al comportamiento del terraplén utilizaremos el programa CODE_BRIGHT, que permite una modelación mediante elementos finitos de un problema acoplado mecánico, hidráulico y térmico.

En nuestro caso se resolverá únicamente la parte termo-hidráulica, ya que no disponemos de datos del comportamiento mecánico del terraplén durante el experimento y las deformaciones mecánicas pueden considerarse pequeñas.

3.1 Code Bright

El método de elementos finitos es un método numérico que permite solucionar ecuaciones diferenciales parciales de manera sencilla y metódica. Para ello se discretiza el dominio de cálculo (el suelo) dividiéndolo en pequeñas superficies geométricas (elementos finitos) que no interseccionan entre si pero están en contacto unas con otras mediante sus lados. Los contactos entre vértices se denominan nodos y es ahí donde se resuelven las ecuaciones llamadas funciones de forma buscando el equilibrio del sistema dentro de una tolerancia definida, ya que el cálculo será siempre una aproximación.

El cálculo se realiza partiendo de una geometría definida, unos materiales determinados, unas condiciones de contorno y unas condiciones iniciales que definiremos con anterioridad. Así mismo será necesario definir el paso de tiempo.

Será necesario que el problema converja hacia una solución válida, ya que en caso contrario los resultados no serán útiles y el programa puede cancelar sus cálculos. Por tanto, en este tipo de métodos es imprescindible realizar un análisis de los resultados obtenidos antes de darlos por buenos.

3.2 Formulación matemática

Como hemos aclarado anteriormente, nosotros analizaremos solo la parte termo-hidráulica del problema, ya que no disponemos de suficientes datos para poder modelar la parte mecánica. Sin embargo, se debería considerar que cualquier cambio térmico o hidráulico en la estructura del suelo genera desplazamientos mecánicos en el medio poroso. Analizaremos a continuación como resuelve Code Bright un modelo acoplado Termo-Hidro-Mecánico y después simplificaremos la formulación para el caso que nos ocupa.

Lo primero que cabe destacar es que el programa trabaja con especies, y no con fases. En un suelo no saturado encontramos 3 especies: agua, aire y suelo en diferentes fases. Así podemos encontrar la fase líquida compuesta por agua líquida y aire disuelto o la fase gaseosa compuesta por aire y vapor de agua. La fase sólida está siempre formada

por las partículas de suelo, ya que no consideraremos temperaturas menores a 0°C y por tanto no encontraremos agua congelada.

FASES	Sólida	s	Suelo
	Líquida	l	Agua + aire disuelto
	Gas	g	Aire seco + Vapor de agua
ESPECIES	Suelo	-	Esqueleto mineral, coincide con la fase sólida.
	Agua	w	Líquida + vapor de agua en la fase gas.
	Aire	a	Aire seco (Gas + aire disuelto en la fase líquida.)

Tabla 2. Resumen de las fases y especies que intervienen en la modelación

Para la formulación del problema se asume que:

- El aire seco se considera una especie única y es el componente principal de la fase gaseosa. La ley de Henry se usa para expresar el equilibrio del aire disuelto.
- Se asume equilibrio térmico de forma que las tres fases están a la misma temperatura.
- La concentración de vapor está en equilibrio con la fase líquida, como expresa la ley psicrométrica.
- Las variables de estado son: los desplazamientos del sólido, u (en las tres direcciones); la presión de agua, P_l ; la presión de gas P_g ; y la temperatura, T .
- El balance de momento del medio se reduce a la ecuación de equilibrio de tensiones con un modelo constitutivo mecánico para relacionar tensiones y deformaciones. Las deformaciones se definen en función de desplazamientos.
- Se consideran pequeñas deformaciones para el esqueleto sólido. Los términos advectivos debidos a los desplazamientos del suelo se desprecian.
- El balance de momento para especies disueltas y para la fase líquida se reduce a las ecuaciones constitutivas (Ley de Fick's y ley de Darcy).
- Los parámetros físicos en las ecuaciones constitutivas son función de la presión y la temperatura.

3.2.1 Ecuaciones de gobierno

Las ecuaciones de gobierno que rigen este problema se pueden clasificar en 4 grandes grupos:

3.2.1.1 Ecuaciones de balance

ECUACIÓN	VARIABLE
Equilibrio de tensiones	Desplazamientos, u
Balance de la masa de agua	Presión de agua, P_l
Balance de la masa de aire	Presión de gas, P_g
Balance de la energía interna	Temperatura, T

Tabla 3. Ecuaciones de balance

ϕ	Porosidad	b	Fuerzas másicas
ρ	Densidad	ω	Fracción másica
j	Flujo másico	θ	Contenido másico por unidad de volumen $\theta = \rho\omega$
i	Flujo no advectivo	E	Energía interna por unidad de masa
q	Flujo advectivo	i_c	Conducción de calor
u	Desplazamientos del sólido	j_E	Flujo advectivo de energía
σ	Tensor de tensiones	S_l, S_g	Grado de saturación del líquido y del gas.

Subíndice: s (fase sólida), l (fase líquida), g (fase gaseosa)

Superíndices: w (agua), a (aire)

Tabla 4. Resumen de los parámetros de las ecuaciones

- **Balance de masa:** se lleva a cabo para cada especie por separado: agua, aire y sales, en lugar de para las fases sólida, líquida y gas.

Ecuación de balance de sólido

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_s(1 - \phi)) + \nabla \cdot (j_s) = 0$$

Ecuación de balance de agua

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_l^w S_l \phi + \theta_g^w S_g \phi) + \nabla \cdot (j_l^w + j_g^w) = f^w$$

Ecuación de balance de aire

$$\phi \frac{D_s(\theta_l^w S_l + \theta_g^w S_g)}{Dt} + (\theta_l^w S_l + \theta_g^w S_g) \frac{D_s \phi}{Dt} + (\theta_l^w S_l + \theta_g^w S_g) \phi \nabla \cdot \frac{du}{dt} + \nabla \cdot (j_l^a + j_g^a) = f^a$$

- **Ecuación de balance de energía interna** para el medio en conjunto. La variable es la temperatura, T.

$$\frac{\partial}{\partial t}(E_s \rho_s(1 - \phi) + E_l \rho_l S_l \phi + E_g \rho_g S_g \phi) + \nabla \cdot (i_{Es} + j_{Es} + j_{El} + j_{Eg}) = f^Q$$

- **Ecuación de balance de momento**, que se reduce al equilibrio de tensiones. La variable de esta ecuación son los desplazamientos, u.

$$\nabla \cdot \sigma + b = 0$$

3.2.1.2 Ecuaciones constitutivas

Establecen la relación entre las variables independientes (o incógnitas, u , T , P_l , P_g) y las variables dependientes que vemos a continuación.

ECUACIÓN	VARIABLE
Ley de Darcy	Flujo advectivo de gas y líquido, q_l , q_g
Ley de Fick	Flujos no advectivos de vapor y aire, i_g^w, i_l^a
Ley de Fourier	Flujo conductivo de calor, i_c
Curva de retención	Grado de saturación de la fase líquida, S_l , S_g

Tabla 5. Ecuaciones constitutivas

- Ley de Darcy.

$$q_\alpha = -K_\alpha(\nabla P_\alpha - \rho_\alpha g)$$

Donde α representa la fase (líquida o gas), g es el vector de gravedad y K_α es el tensor de permeabilidad de cada fase y se expresa como:

$$K_\alpha = k \left(\frac{k_{r\alpha}}{\mu_\alpha} \right)$$

$k_{r\alpha}$ es la permeabilidad relativa, μ_α es la viscosidad dinámica y k es el tensor de permeabilidad del material, que depende de la porosidad del suelo. La variación de la permeabilidad intrínseca con la porosidad se obtiene mediante la expresión de Kozeny.

$$k = k_0 \frac{\phi^3}{(1 - \phi)^2} \frac{(1 - \phi_0)^2}{\phi_0^3}$$

ϕ_0 es una porosidad de referencia que nos permite calcular k en función de una nueva porosidad conociendo la permeabilidad para dicha porosidad de referencia, k_0 .

- Ley de Fick.

$$i_\alpha^i = -(\tau \phi \rho_\alpha S_\alpha D_m^i I) \nabla \omega_\alpha^i$$

τ es la tortuosidad y D_m^i es el coeficiente de difusión de la especie i en la fase α , en $[m^2/s]$.

$$D_m^{vapor} = D \left(\frac{(273.15 + T)^n}{P_g} \right)$$

Donde P_g es la presión de gas en Pascales, y D y n son parámetros.

La tortuosidad, τ se considera constante e igual a τ_0 .

- **Ley de Fourier.**

$$i_c = -\lambda \nabla T$$

Donde λ es la conductividad térmica del medio poroso. Este parámetro se establece como una media entre λ_{dry} y λ_{sat} , ya que en principio nuestro suelo no estará ni seco completamente, ni saturado.

Para obtener los valores de λ_{dry} y λ_{sat} Tenemos dos posibilidades:

- Aportar directamente los valores λ_{dry} y λ_{sat} , a partir de medidas hechas en laboratorio.
- Dar la conductividad de las diferentes fases del suelo (λ_{solid}), λ_{liquid} y λ_{gas} . A partir de estos datos el programa calcula unos valores de λ_{dry} y λ_{sat} , dependiendo de la porosidad y la temperatura.

En nuestro caso utilizaremos la opción a, proporcionándole al programa directamente los valores de λ_{dry} y λ_{sat} .

- **Curva de retención del material.**

La curva de retención relaciona la succión con el grado de saturación. Siguiendo el modelo potencial, la permeabilidad relativa depende del grado de saturación de la siguiente forma:

$$K_{rl} = A S_e^\lambda$$

La curva de retención del material en función del grado de saturación, está definida como:

$$S_e = \left(\left(\frac{P_g - P_l}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda} \quad \text{con} \quad P = P_0 \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

Donde P_0 y σ_0 son dos parámetros del material medidos a una temperatura de 20°C

3.2.1.3 Condiciones de equilibrio²³

Al igual que las ecuaciones constitutivas establecen relaciones entre las incógnitas y las variables dependientes. Se obtienen asumiendo equilibrio químico de la disolución de diferentes especies en fases.

ECUACIÓN	VARIABLE
Ley de Henry	Fracción másica de aire disuelto, w_l^a
Ley de Psicrométrica	Fracción másica de vapor, w_g^w

Tabla 6. Condiciones de equilibrio

- **Ley de Henry.**

$$\omega_l^a = \frac{P_a M_a}{H M_w}$$

Donde P_a es la presión parcial del aire y M_a su masa molecular (0.02895 kg/mol). H es una constante (100000 MPa). Igualmente M_w es la masa molecular del agua. ω_l^a es la fracción de masa del aire en la fase líquida, que se obtiene como $\theta_l^a = \omega_l^a \rho_l$.

- **Ley de Psicrométrica.**

$$\theta_g^w = (\theta_g^w)^0 \exp\left(\frac{-(P_g - P_l)M_w}{R(273.15 + T)\rho_l}\right)$$

Donde $(\theta_g^w)^0$ es la densidad de vapor en fase gaseosa en contacto con una superficie plana, fuertemente dependiente de la temperatura. M_w es la masa molecular del agua (0.018 kg/mol), R es la constante del gas (8.314 J/mol K).

3.2.1.4 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno se producen en términos de flujos o tensiones a través o sobre los contornos del dominio. Estos términos se substituyen por flujos nodales o fuerzas en la forma discreta de las ecuaciones. Para las ecuaciones de balance las condiciones de contorno se incorporan por medio de la adición de los ratios de flujos en cada nodo.

Condiciones atmosféricas

La interacción de la superficie del suelo con la atmósfera se debe a flujos de agua, gas y calor que provienen de las precipitaciones, la evaporación, la radiación y la temperatura.

ECUACIÓN	VARIABLE
Flujo de agua	Agua que atraviesa la superficie del suelo
Flujo de calor	Calor que atraviesa la superficie suelo-atmósfera

Tabla 7. Condiciones atmosféricas

- **Flujo de agua.**

Este flujo viene dado por el balance de la lluvia (P), la evaporación (E), el flujo convectivo de vapor por el movimiento del aire (j_g^w) y la escorrentía superficial (j_{sr}).

$$j_w = P - j_{sr} + E + j_g^w$$

Se define la escorrentía superficial como el agua que no se infiltra en el terreno y corre por la superficie. Viene determinada por la diferencia de presión del agua y la presión atmosférica. De esta forma, cuando el suelo está saturado ($P_l > P_{ga}$) toda el agua correrá por la superficie y no habrá infiltración.

$$J_{sr} = \gamma_w (P_l - P_{ga}) \quad \text{si } P_l > P_{ga}$$

$$J_{sr} = 0 \quad \text{si } P_l \leq P_{ga}$$

La evaporación (E) es el flujo difusivo de vapor, es decir, es un flujo debido a la diferencia de concentración de vapor entre el suelo y la atmósfera. La expresión de Louis (1979), nos relaciona estas concentraciones con la evaporación.

$$E = r_a (\theta_{g0}^w - \theta_g^w)$$

r_a es resistencia aerodinámica de la interficie terreno-atmósfera y se define como:

$$r_a = \frac{k^2 v_a \phi}{\ln \left(\frac{z_a}{z_0} \right)^2}$$

Donde v_a es la velocidad del viento a una altura z_a , z_0 es la altura de la rugosidad del terreno y k es la constante de von Karman (generalmente 0.4). ϕ es un parámetro estabilizador.

El flujo convectivo de vapor (j_g^w) está dado por:

$$j_g^w = \omega_g^w q_g$$

Donde q_g es el flujo de gas dado por la ley de Darcy

- **Flujo de calor.**

Se define como la suma de la radiación solar (R_n), el calor sensible (H_s) y el flujo convectivo de calor por el agua, aire y vapor (H_c).

$$J_e = R_n + H_s + H_c$$

La radiación que entra en el terreno la podemos descomponer como la radiación directa (R_s), la radiación emitida por la atmósfera y absorbida por el suelo (R_a), donde ε_a es la emisividad de la atmósfera, y la radiación saliente emitida por el suelo (R_g).

$$R_n = R_s(1 - A_l) + \varepsilon_a R_a + R_g$$

La radiación directa viene controlada por el albedo (A_l), que es el porcentaje de radiación que refleja una superficie. Por tanto la cantidad de energía que atraviesa el terreno será $R_s(1 - A_l)$. Igualmente, la radiación emitida por la atmósfera vendrá controlada por la emisividad de la atmósfera, ε_a .

$$\varepsilon_a = 0.605 + 0.048\sqrt{1370\rho_{va}}$$

Donde ρ_{va} es la densidad del vapor en la atmósfera.

Además, los flujos de radiación obedecerán siempre la ley de Stefan-Boltzman, que define que la potencia emitida por un cuerpo negro varía con la potencia cuarta de su temperatura absoluta, y la potencia emitida por una superficie real es algo menor, controlada por la emisividad de dicha superficie (ε)

$$R = \varepsilon\sigma T^4$$

σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.6704 \cdot 10^{-8} \text{ J/s m}^2 \text{ K}^4$)

Se define el flujo de calor sensible a través de la superficie por diferencia de temperatura (flujo conductivo) como:

$$H_s = r_a \rho_a C_a (T_0 - T)$$

C_a es el calor específico, T_0 es la temperatura de la atmósfera y r_a la resistencia aerodinámica.

Por último, el flujo de calor se determina teniendo en cuenta la energía interna del agua líquida, la del vapor y la del aire seco.

$$H_c = e_w(T - J_{sr}) + e_v(E - J_g^w) + e_a q_g^a$$

Donde $q_g^a = \omega_g^a q_g = (1 - \omega_g^v) q_g$ es el flujo de aire seco a través de la superficie.

Capítulo 4. Modelación del terraplén.

Con el fin de implementar el cálculo en CodeBright necesitaremos reproducir tanto la geometría como los materiales y condiciones del terraplén a escala construido en Escocia de forma que podamos comparar los resultados del modelo con los medidos durante el experimento.

4.1 Introducción.

Al tratarse de un problema Termo-Hidráulico, donde se desprecia la parte mecánica, solamente será necesario resolver la ecuación de balance de agua y la ecuación de balance de energía. Se considerará que la masa de aire es perfectamente móvil y por tanto se asume una presión de gas constante e igual a la atmosférica de 0.1 MPa. Además, se deberá permitir la posibilidad de encontrar agua en la fase gaseosa.

Para la resolución de dichas ecuaciones de balance el programa utiliza un método iterativo directo LU hacia atrás.

4.2 Modelación del terraplén.

La geometría viene definida por el terraplén construido en el laboratorio. Tiene 1 metro de altura con una coronación de 1.35 metros de ancho y dos taludes con una pendiente de 28.1 grados. En los laterales tenemos dos bermas de 0.2 metros de alto y 2 m de largo. Sin embargo, se asumirá que dichas bermas solo tienen 0.4 metros de largo ya que a partir de esa longitud podemos considerar despreciable su efecto sobre el terraplén. En la siguiente figura podemos ver un esquema de las dimensiones y de la posición de los sensores TethraProbe y los tensiómetros. Por último, se considerará un ancho de 1 metro del terraplén en la dirección perpendicular.

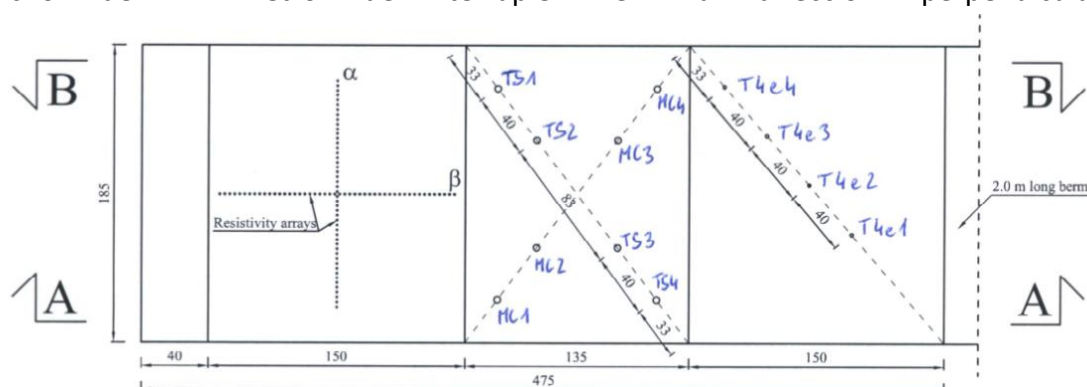


Figura 9. Planta del terraplén a escala.

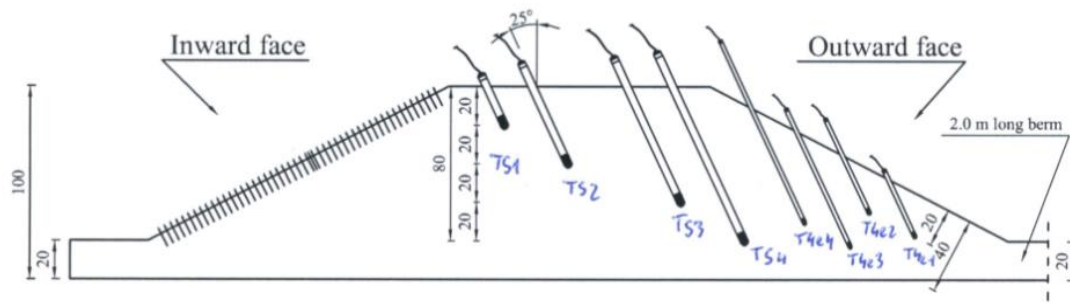


Figura 10. Alzado del terraplén a escala con la profundidad de los tensiómetros

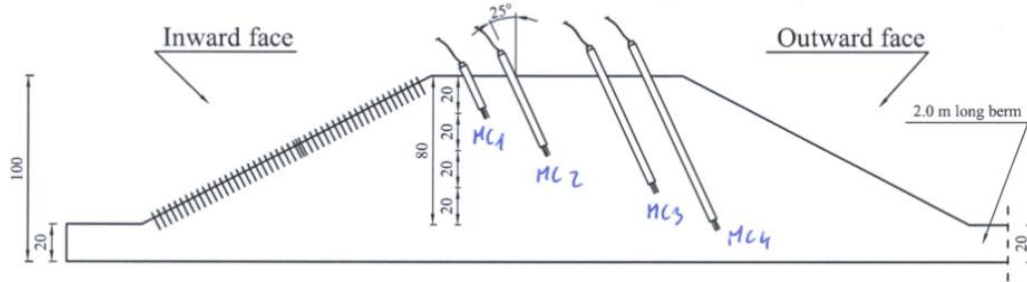


Figura 11. Vista en alzado del terraplén a escala con la profundidad de las sondas ThetraProbe.

Nos encontramos con una situación particular a la hora de implementar las condiciones iniciales de presión de agua y temperatura ya que observamos que no son constantes con la profundidad, ni siguen una tendencia lineal. Dado que son las dos únicas posibilidades que nos ofrece el programa, deberemos dividir la geometría del terraplén en dos mitades (superior e inferior) con el fin de crear una ley lineal de presiones y temperaturas entre los tensiómetros TS1 y TS2 y otra diferente para los tensiómetros TS3 y TS4. Esta situación se describirá más detalladamente en el correspondiente apartado. La geometría final introducida se puede apreciar en la siguiente figura.

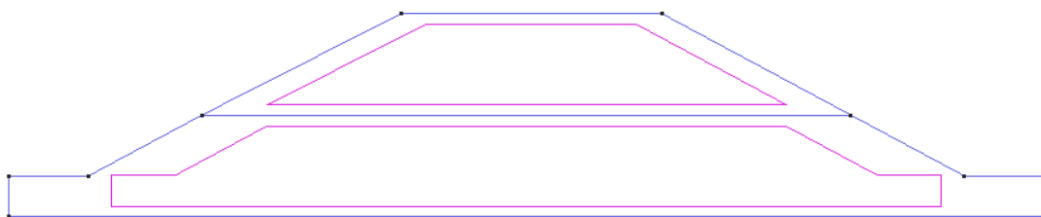


Figura 12. Geometría del terraplén en el modelo.

4.3 Condiciones de contorno.

Aplicaremos condiciones de flujo, relacionadas con las precipitaciones y la radiación proveniente de los focos. Consideraremos que, dada la distancia de 1 metro de los focos sobre el terraplén, la radiación incidirá de forma perpendicular tanto en la coronación como en los taludes y en la parte superior de las bermas. Sin embargo, la precipitación

no incide de forma perpendicular sobre los taludes, por lo que deberemos aplicarle un factor corrector en función del ángulo del talud de 0.8824.

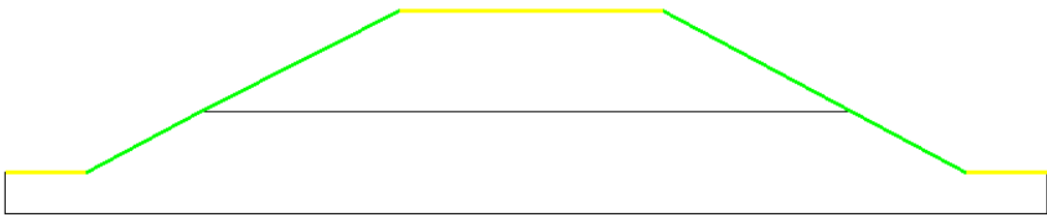


Figura 13. Condiciones de flujo atmosférico.

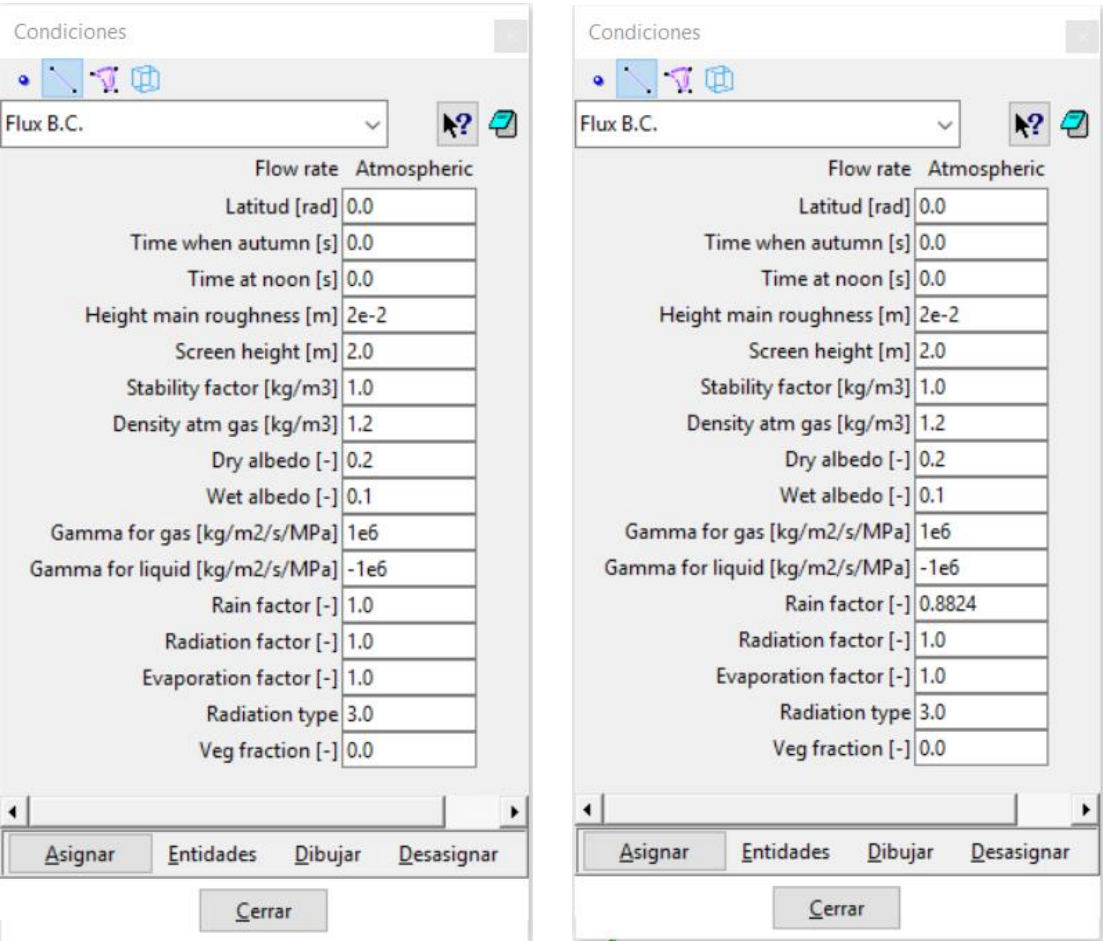


Figura 14. A la izquierda, condiciones atmosféricas sobre las superficies perpendiculares (líneas amarillas) y a la derecha sobre los taludes (líneas verdes).

En el caso de nuestro experimento, las condiciones atmosféricas se simularon dentro de una cámara ambiental, por lo que no se deberán considerar ciclos de día y noche ni nubosidad. Los tres primeros parámetros que encontramos sirven para condiciones atmosféricas al aire libre, por lo que a nosotros no nos afectan. La altura del viento es

de 2 metros por encima del terraplén, y se considerará una altura de rugosidad del terreno de 0.02 (generalmente toma valores pequeños, del orden de esta magnitud).

4.4 Condiciones iniciales.

Las condiciones iniciales vendrán dadas por los valores de presión y temperatura medidos por los tensiómetros en el inicio del experimento.

Altura sensor (m)	Temperatura (°C)	Succión (MPa)	Presión gas (MPa)	Presión agua (MPa)
0.8	18.432	0.07526	0.1	0.0925
0.6	18.355	0.00384	0.1	0.0962
0.4	18.074	0.0043	0.1	0.0957
0.2	18.202	0.00454	0.1	0.0955

Tabla 8. Condiciones iniciales de succión y temperatura

Se puede observar que ni la presión de agua ni la temperatura son constantes con la profundidad, pero tampoco siguen una ley lineal. Por este motivo se ha dividido la geometría del terraplén en 2 mitades a la altura de 0.5 metros, pudiendo de esta manera implementar una condición inicial de presión y temperatura en la parte superior que varíe entre los valores de los tensiómetros situados a la altura 0.8 y 0.6 de la base del terraplén y otra ley lineal diferente para los otros dos sensores, situados en la mitad inferior de la geometría.

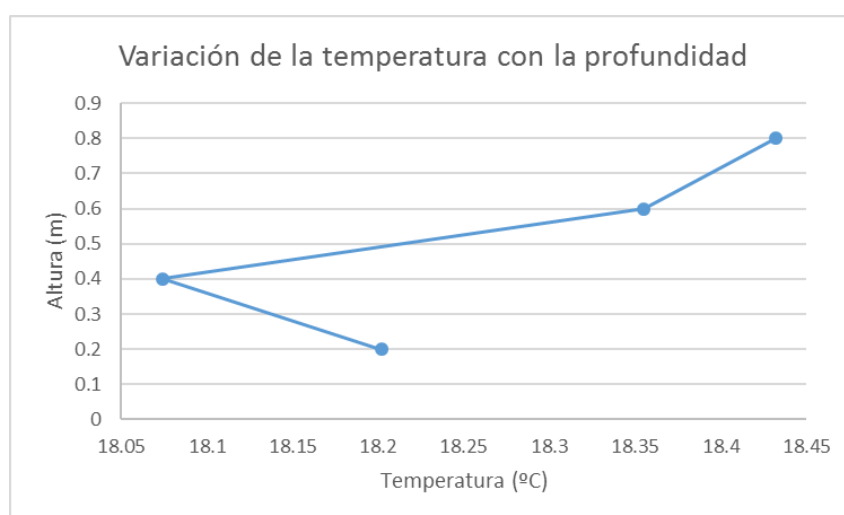


Figura 15. Variación de la temperatura con la profundidad en el instante inicial.

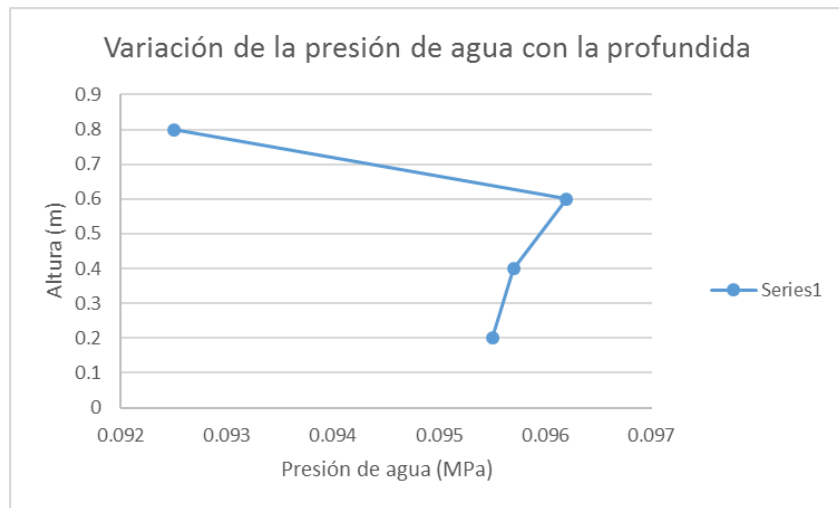


Figura 16. Variación de la presión de agua con la profundidad en el instante inicial

Condiciones

Initial unknowns

Distribución Linear

Ux [m]	0
Uy [m]	0
Uz [m]	0
PI [MPa]	0.0925
Pg [MPa]	0.1
T [°C]	18.432
Concentration [kg/kg]	0
Ux [m] -Final Point-	0
Uy [m] -Final Point-	0
Uz [m] -Final Point-	0
PI [MPa] -Final Point-	0.0962
Pg [MPa] -Final Point-	0.1
T [°C] -Final Point-	18.355
Concentration [kg/kg] -Final Point-	0
X Initial Point	0.8
Y Initial Point	0
Z Initial Point -only for 3D-	0.6
X Final Point	0
Y Final Point	0
Z Final Point -only for 3D-	0

Asignar Entidades Dibujar Desasignar

Cerrar

Condiciones

Initial unknowns

Distribución Linear

Ux [m]	0
Uy [m]	0
Uz [m]	0
PI [MPa]	0.0957
Pg [MPa]	0.1
T [°C]	18.074
Concentration [kg/kg]	0
Ux [m] -Final Point-	0
Uy [m] -Final Point-	0
Uz [m] -Final Point-	0
PI [MPa] -Final Point-	0.0955
Pg [MPa] -Final Point-	0.1
T [°C] -Final Point-	18.202
Concentration [kg/kg] -Final Point-	0
X Initial Point	0.4
Y Initial Point	0
Z Initial Point -only for 3D-	0.2
X Final Point	0
Y Final Point	0
Z Final Point -only for 3D-	0

Asignar Entidades Dibujar Desasignar

Cerrar

Figura 17. A la izquierda, condiciones iniciales de presión y temperatura en la parte superior del terraplén. A la derecha, en la parte inferior.

Por último, será necesario definir una porosidad inicial del material. Basándonos en los ensayos realizados sobre muestras del terreno real, con un índice de vacíos de 0.61, obtenemos una porosidad de 0.38 que utilizaremos inicialmente para lanzar el cálculo.

4.5 Material.

En este apartado definiremos todos los parámetros asociados al suelo sobre el que estamos trabajando.

4.5.1 Datos térmicos e hidráulicos del material

Curva de retención (Van Genuchten)

Presión capilar	P_0	(*)	MPa
Tensión superficial a 20°C	σ_0	0.072	N/m
Factor de función de forma	λ	(*)	-
Saturación residual	S_{rl}	0	-
Saturación máximo	S_{ls}	1	-

Permeabilidad intrínseca (Kozeny)

Permeabilidad intrínseca (primera dirección principal)	K_{11}	(*)	m
Permeabilidad intrínseca (segunda dirección principal)	K_{22}	(*)	m
Permeabilidad intrínseca (tercera dirección principal)	K_{33}	(*)	m
Porosidad del material	Φ_0	0	-

Permeabilidad relativa en fase líquida (Potencial)

Potencia	λ	3	-
Constante	A	1	-
Saturación residual	S_{rl}	0	-
Saturación máxima	S_{ls}	1	-

Flujo conductivo de calor

Conductividad térmica en medio poroso seco	λ_{dry}	(*)	W mK⁻¹
Conductividad térmica en medio poroso saturado	λ_{sat}	(*)	W mK⁻¹

Tabla 9. Datos térmicos e hidráulicos del material

Los parámetros marcados con el símbolo (*) representan las variables que se han ido cambiando durante el análisis y cuyos valores se discuten en apartado 4.9

4.5.2 Propiedades de las fases

Fase sólida

Calor específico	C_s	800	J/kg K
Densidad específica	ρ_s	2700	Kg/m ³

Fase líquida

Densidad	ρ_{lo}	1002.6	Kg/m ³
Compresibilidad	β	4.5e-4	MPa ⁻¹
Coeficiente volumétrico de expansión térmica del agua	α	-3.4e-4	°C ⁻¹
Variación de solutos	γ	0.6923	-
Presión	P_{lo}	0.1	MPa

Fase gaseosa

Densidad	M_a	0.02895	Kg/mol
Presión	H	10000	MPa

Tabla 10. Propiedades de las fases

4.6 Datos de intervalo

El experimento abarca 20 días y se miden 20 horas de cada día, que suman un total 481 horas.

Figura 18. Datos de intervalo.

4.7 Malla de elementos finitos

El programa utiliza una malla formada por triángulos. La malla utilizada durante la implementación del modelo en este trabajo ha ido variando, empezando por mallas más gruesas en los primeros cálculos y procurando unas mallas más finas para conforme se iba ajustando el modelo. De esta forma hemos conseguido un ahorro de tiempo para los primeros cálculos aproximados.

4.8 Datos atmosféricos

Para que el programa pueda reproducir las condiciones ambientales que se crearon en la cámara ambiental es necesario crear una hoja atmosférica que ordene estos datos de una forma determinada y permita que pueda leer como eran cada una de las condiciones en cada instante de tiempo. Disponemos de datos cada 30 segundos, durante 20 días.

Las condiciones atmosféricas vendrán determinadas por la radiación, el viento, las precipitaciones, la temperatura ambiental y la humedad ambiental. Se verá a continuación como se ha creado esta hoja.

4.8.1 Radiación

Sobre el terraplén construido en el laboratorio existían 6 calentadores infrarrojos de 1.2kW cada uno. A partir de este valor, y considerando el área del terraplén sobre el que inciden los rayos, hemos calculado un valor de radiación de $756 \text{ J/m}^2\text{s}$. Sin embargo, estos calentadores solo se activan cuando la temperatura del laboratorio desciende de cierto valor. Como a priori no tenemos datos del tiempo que están encendidos se tendrán que hacer suposiciones e ir variándolas según analicemos los resultados.

4.8.2 Viento

En la gráfica siguiente se pueden ver los resultados de un experimento en el que se midieron diferentes velocidades de viento dependiendo de la distancia. En nuestro caso, los ventiladores que se usaron se situaban a 1 metro sobre el terraplén, por lo que en un principio consideramos una velocidad de viento de 5 m/s . Como en el caso anterior, los ventiladores se encendían y apagaban dependiendo de la temperatura del laboratorio y desconocemos los tiempos exactos.

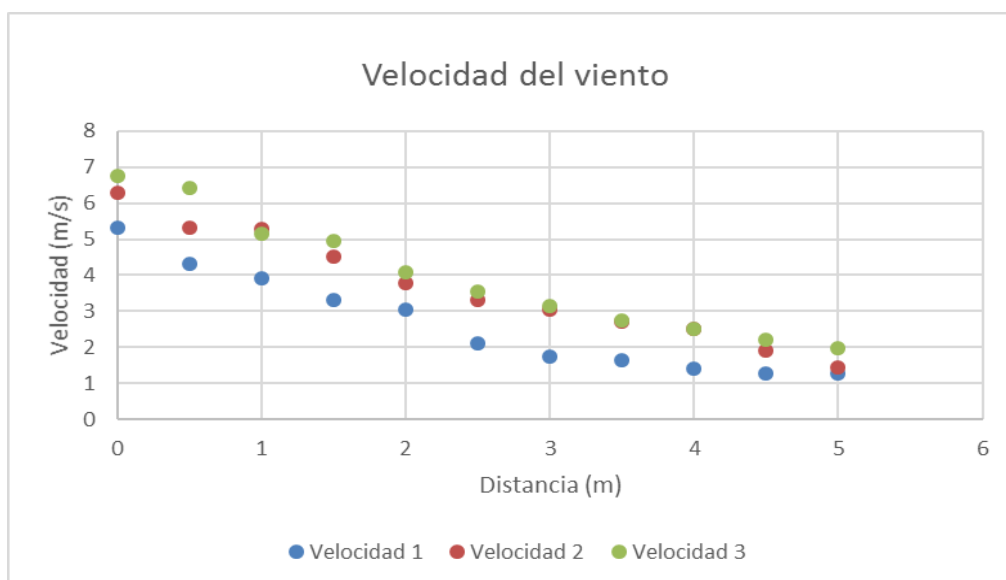


Figura 19. Velocidad del viento en función de la distancia al ventilador.

4.8.3 Precipitación

Sabemos que se produjeron dos ciclos de precipitaciones durante el experimento y que cada uno duró 16 horas con una intensidad de 55mm/h, que equivalen a 0.015278 kg/m²s. No se sabe el tiempo exacto en el que se encendieron los aspersores, pero se ha supuesto que empezaron el 14 de julio y el 21 de julio a las 12 de la noche y se apagaban a las 4 de la tarde, una hora asequible para después poder sacar resultados. Estos dos días se han obtenido aproximadamente a partir de la figura siguiente, y podrán modificarse posteriormente si vemos que el ajuste de los resultados lo requiere.

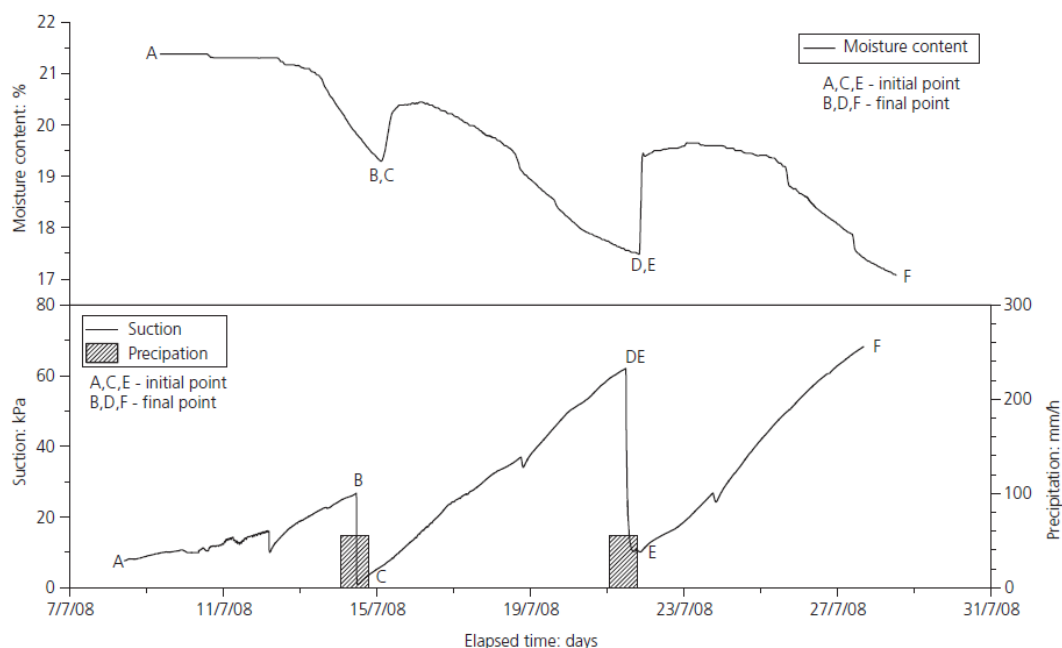


Figura 20. Variación de la succión y contenido de agua a lo largo del experimento.

4.8.4 Datos de humedad relativa y temperatura ambiente

Estos datos los obtenemos directamente de las medidas tomadas en el laboratorio durante el experimento. En el anejo (X) tenemos una gráfica de la variación de estos dos parámetros a lo largo de los 20 días.

4.8.5 Nubosidad

La nubosidad se considera cero ya que no nos encontramos al aire libre, si no en una cámara ambiental.

4.9 Parámetros del estudio

Tenemos 4 parámetros que nos determinan el comportamiento termo hidráulico del material y serán los principales parámetros que iremos variando para ver la dependencia del comportamiento del terraplén con ellos.

4.9.1 Difusividad del vapor

Por un lado, tenemos la difusividad del vapor, utilizada en la ley de Fick.

$$\dot{q}_\alpha^i = -(\tau \phi \rho_\alpha S_\alpha D_m^i I) \nabla \omega_\alpha^i$$

La difusividad es el término que aparece entre paréntesis. Como vemos, depende de la porosidad, la densidad del aire y el grado de saturación de la especie(aire) en el suelo. El factor D_m^i es el coeficiente de difusión del vapor y depende de la temperatura.

$$D_m^{vapor} = D \left(\frac{(273.15 + T)^n}{P_g} \right)$$

Además, encontramos el parámetro τ , que es el único parámetro con el que podemos jugar dentro de esta difusividad y que toma valores normales entre 0.3 y 1 dependiendo de la distribución de los poros y sus conexiones.

4.9.2 Permeabilidad

Trabajaremos con la permeabilidad intrínseca del material (m^2), que depende de la superficie de contacto del agua con el suelo, es decir, del área que rodea los poros. Se relaciona con la permeabilidad en función del grado de saturación.

$$k_w = \frac{k_{int} \rho_w g}{\mu_w} \cdot k_l$$

Como vemos, la permeabilidad del suelo depende de la porosidad a través de la permeabilidad intrínseca, del grado de saturación a través del coeficiente k_l , que toma valores normales entre 0.1 y 1, y de la temperatura a través de la viscosidad del agua.

En términos generales podemos decir que la permeabilidad es del orden de 10^7 veces la permeabilidad relativa.

En este proyecto se ha trabajado variando la permeabilidad relativa en un rango de 10^{-15} a 10^{-17} que equivaldría a permeabilidades de 10^{-8} a 10^{-10} , lo que puede considerarse correcto para un material con finos cercano a un limo como el que nos encontramos.

4.9.3 Conductividad térmica

Este parámetro del material depende de la mineralogía y del grado de saturación. Para un material arcilloso está más cercano a la humedad, mientras que para nuestro material podría moverse en un rango de 1 a 4.

4.9.4 Calor específico

Es una propiedad física del material que depende de la cantidad volumétrica de cada fase. Para un sólido como el nuestro, toma valores de 800 J/kg K. El calor específico del agua es el de referencia y tiene un valor de 1000 J/kg K. En función de estos valores, el

programa realiza una media volumétrica de cada fase en base a la porosidad y el grado de saturación.

4.9.5 Curva de retención

Con la finalidad de conseguir ajustar mejor la succión, se ha realizado un ajuste de la curva de retención del material, que nos relaciona el contenido de agua (a través del grado de saturación), con la succión en el terraplén y por tanto es la ley que más nos controla el proceso.

Para realizar este ajuste se ha utilizado la ecuación de Van Genutchen, que es la que utiliza el modelo a la hora de realizar los cálculos. Así, se han representado los datos de los sensores que se obtuvieron en el laboratorio y se han intentado ajustar los parámetros λ y P de la ecuación.

$$S_e = \left(\left(\frac{P_g - P_l}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda}$$

Se han estudiado 3 curvas de retención diferentes. Una que se ajusta mejor a las succiones bajas y grados de saturación cercanos a 1, otra que se ajusta mejor en las succiones altas y grados de saturación menores y una intermedia a ambos casos.

1. La curva más ajustada en las succiones bajas, es la que se muestra a continuación. Con un parámetro $P = 0.045$ y $\lambda = 0.5$

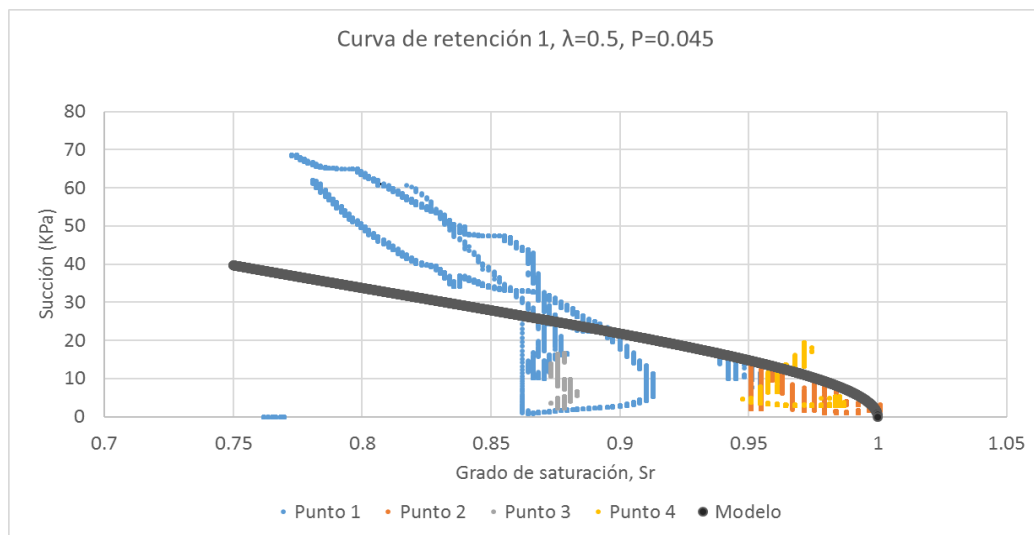


Figura 21. Curva de retención que ajusta a succiones bajas

2. Esta curva se ajusta mejor en la parte alta, como podemos ver en la figura siguiente. Corresponde a un parámetro $P = 0.045$ y $\lambda = 0.23$.

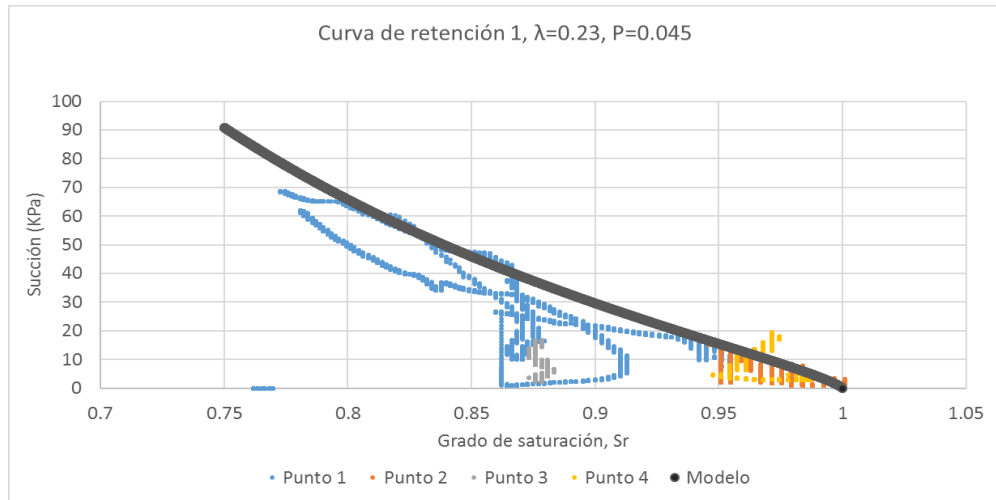


Figura 22. Curva de retención que ajusta las succiones altas

3. Por último, tenemos la curva intermedia, que se corresponde con los valores de los parámetros $P = 0.045$ y $\lambda = 0.3$, y que vemos a continuación.

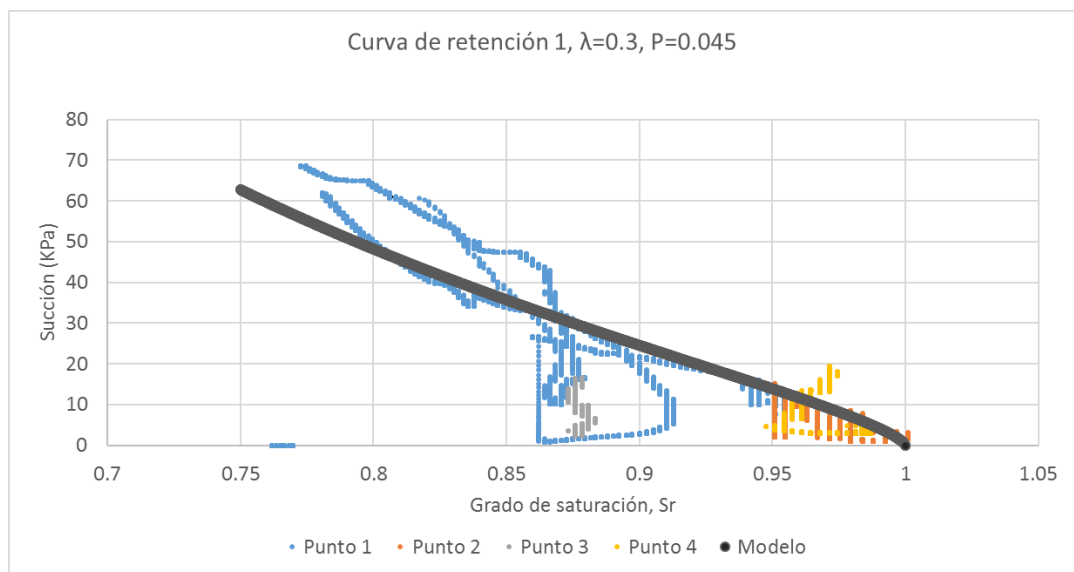


Figura 23. Curva de retención intermedia

En todos los casos, el punto 1 corresponde al punto más superficial del que se tienen medidas del terraplén y el punto 4 es el más profundo. La línea gris, más gruesa, es la curva de Van Genuchten.

Capítulo 5. Análisis de los resultados.

En este apartado estudiaremos como varía la succión y la temperatura en el modelo de terraplén creado con Code Bright comparándolo con los datos de laboratorio disponibles del experimento realizado en Galston (Escocia).

Para ello iremos variando los parámetros antes explicados dentro de los rangos normales para nuestro material, sin pretender ajustarlos a los datos experimentales, simplemente viendo su repercusión en el problema.

En la siguiente tabla podemos ver un resumen de todos los cálculos realizados y de cómo se han ido variando los cuatro parámetros más relevantes: permeabilidad, curva de retención, radiación y calor específico.

	PERMEABILIDAD INTRÍNSECA	CURVA DE RETENCIÓN		RADIACIÓN	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
CASO 1	10^{-15}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 1.0	1.5-2
CASO 2	$2.3 \cdot 10^{-16}$	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 1.0	1.5-2
CASO 3	$2.3 \cdot 10^{-16}$	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 0.5	1.5-2
CASO 4	$2.3 \cdot 10^{-16}$	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 0.1	1.5-2
CASO 5	10^{-15}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	RADIACIÓN REAL	1.5-2
CASO 6	10^{-15}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.23$	RADIACIÓN REAL	1.5-2
CASO 7	10^{-15}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.3$	RADIACIÓN REAL	1.5-2
CASO 8	10^{-16}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 0.1	2-2.5
CASO 9	10^{-16}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 0.1	2.5-3

Tabla 11. Casos estudiados

5.1 Conductividad térmica

Compararemos aquí los resultados obtenidos en los casos 8 y 9, donde se ha variado la conductividad térmica y todos los demás parámetros permanecen igual.

En la siguiente figura podemos ver la succión en el punto más superficial para los dos casos:

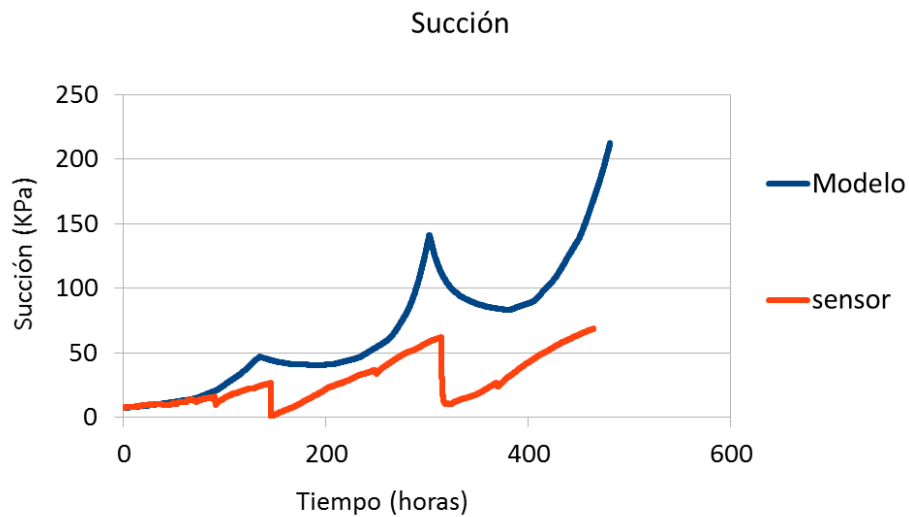


Figura 24. Succión para conductividad térmicas comprendidas entre 2 y 2.5 (caso 8), en el punto situado a 0.2 metros de profundidad.

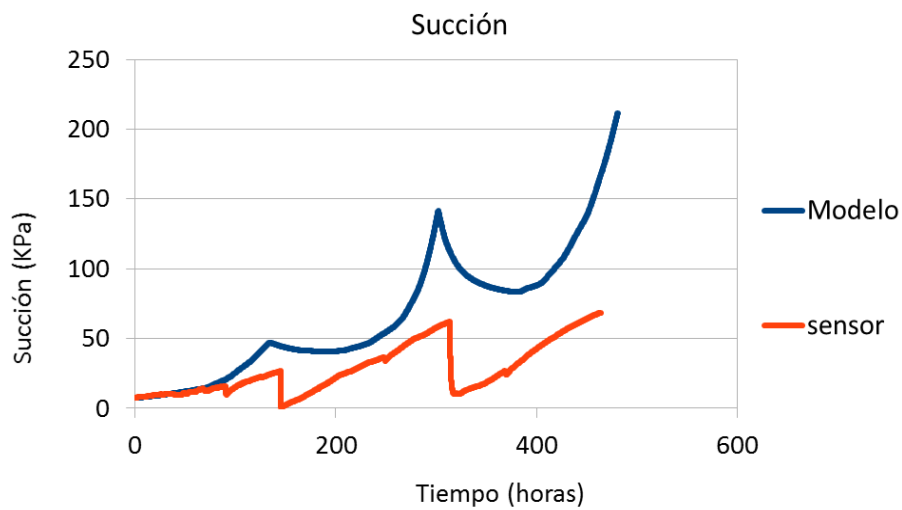


Figura 25. Succión para conductividades térmicas comprendidas entre 2.5 y 3 (caso 9), en el punto situado a 0.2 metros de profundidad

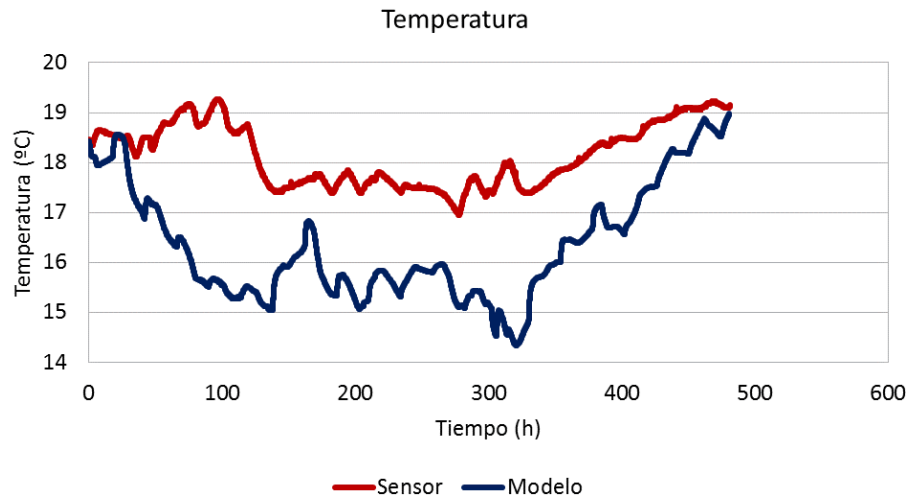


Figura 26. Evolución de la temperatura para el punto situado a 0.2 metros de la superficie, en el caso 8.

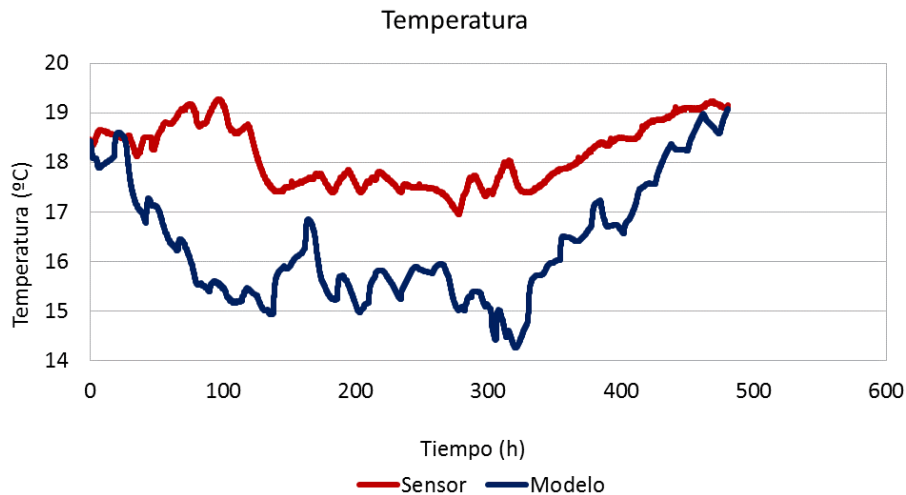


Figura 27. Evolución de la temperatura para el punto situado 0.2 metros de la superficie, en el caso 9.

Como podemos observar no se aprecia diferencia, tanto en la succión como en la temperatura, al variar este parámetro. Esto se debe a que el margen de variación es muy pequeño y no es suficiente para apreciar cambios significativos. Por tanto, podemos decir que este parámetro, si nos movemos en valores normales entre 1 y 4, no va a afectar significativamente a la modelización. Podemos ver la evolución en los otros puntos en los anejos correspondientes.

5.2 Permeabilidad

La permeabilidad es el parámetro que nos controla la infiltración del agua en el terreno. En este análisis hemos variado el valor de la permeabilidad intrínseca en un rango de 10^{-15} a 10^{-17} m², lo que equivale a permeabilidades de 10^{-8} a 10^{-10} m/s

Analizaremos en este caso la comparación de los casos 1 y 2; donde las permeabilidades intrínsecas son, respectivamente, 10^{-15} y $2.3 \cdot 10^{-16}$. En este caso cabe estudiar tanto el punto más superficial como el punto más profundo, ya que se pueden extraer diferentes conclusiones.

Para el punto más superficial Se observa en las siguientes figuras como al disminuir la permeabilidad la succión aumenta.

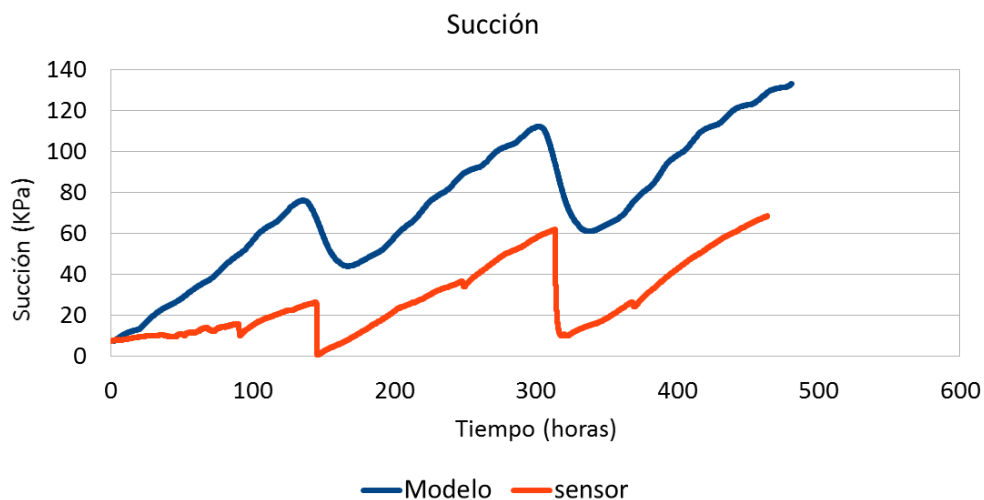


Figura 28. Evolución de la succión en el punto situado a 0.2 metros de la superficie para el caso 1, con permeabilidad relativa de 10^{-15} m^2 .

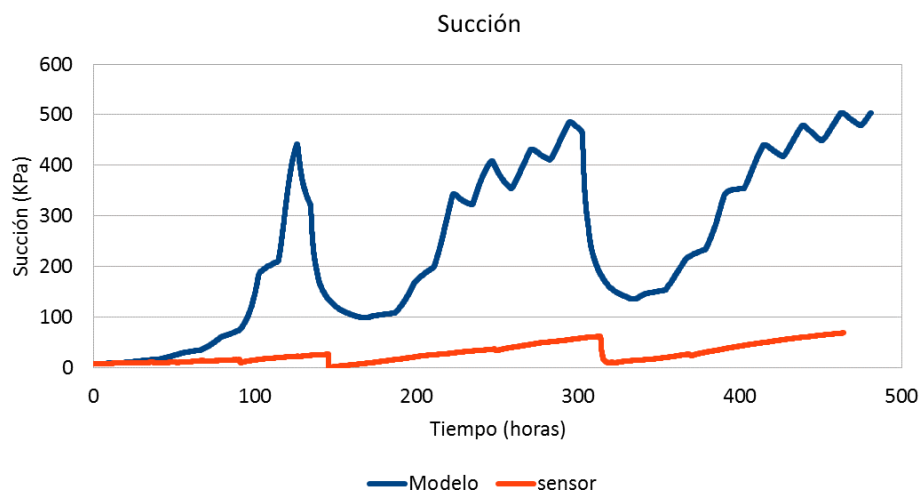


Figura 29. Evolución de la succión en el punto situado a 0.2 metros de la superficie para el caso 2, con permeabilidad relativa de $2.3 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$.

Este aumento de la succión se debe a que al aumentar la permeabilidad el agua no se infiltra con tanta facilidad, por lo que tenemos un suelo más seco. La evaporación, sin embargo, no se ve afectada, ya que no depende de la permeabilidad si no de la radiación, como veremos más adelante.

Para el punto más profundo tenemos el caso contrario. Al bajar la permeabilidad la lluvia tarda más en llegar, pero no tenemos el efecto de la evaporación a esta profundidad y eso nos lleva a una disminución de la succión con la disminución de permeabilidad, como podemos apreciar a continuación

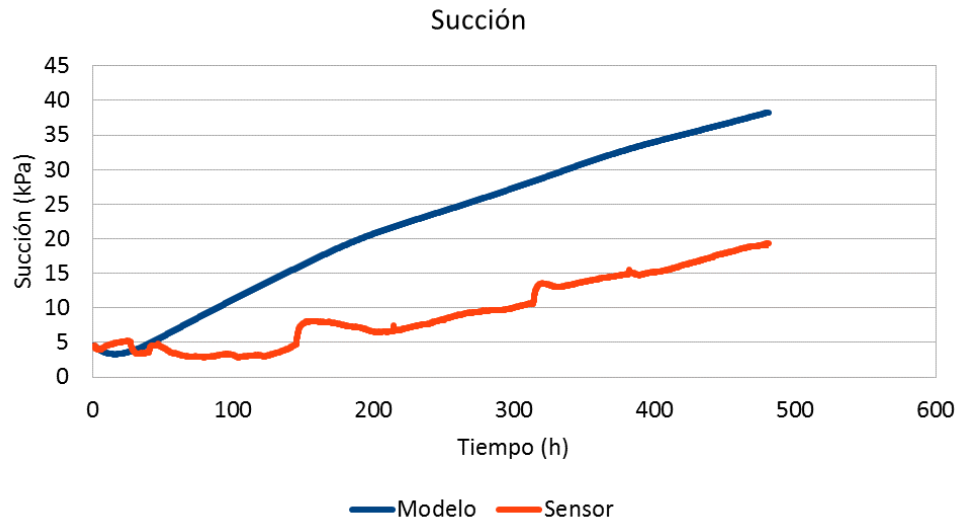


Figura 30. Evolución de la succión en el punto situado a 0.8 metros de la superficie para el caso 1, con permeabilidad intrínseca de 10^{-15} m^2 .

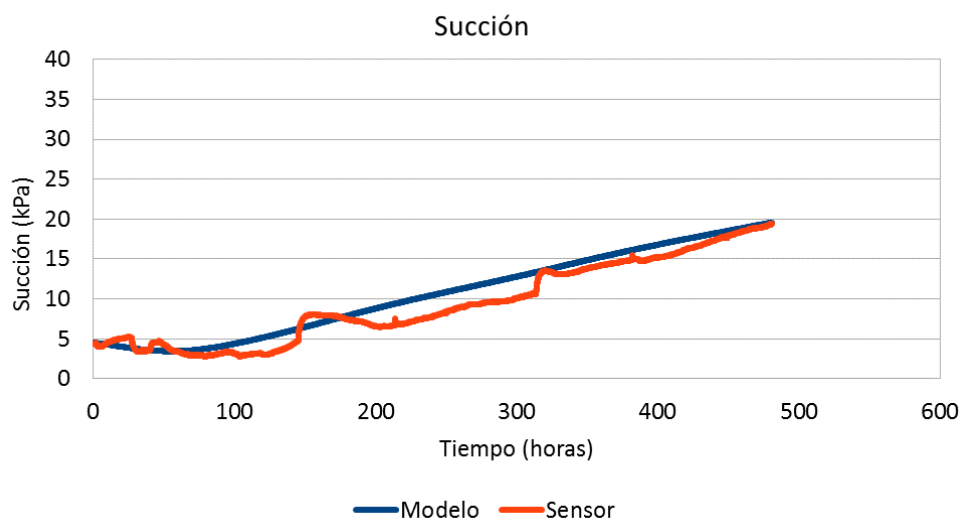


Figura 31. Evolución de la succión en el punto situado a 0.8 metros de la superficie para el caso 3, con permeabilidad intrínseca de 10^{-15} m^2

5.3 Curva de retención

Es la ley que más controla el proceso. Relaciona la permeabilidad con el grado de saturación, y la difusividad con el grado de saturación del aire.

Compararemos ahora los casos 5,6 y 7 donde tenemos los tres tipos de curva de retención que hemos ajustado. El caso 5 se corresponde con la curva de retención que ajusta mejor las succiones bajas, mientras el 6 ajusta mejor las succiones altas y el 7 es un caso intermedio.



Figura 32. Evolución de la succión para el punto más superficial con la curva de retención nº1.

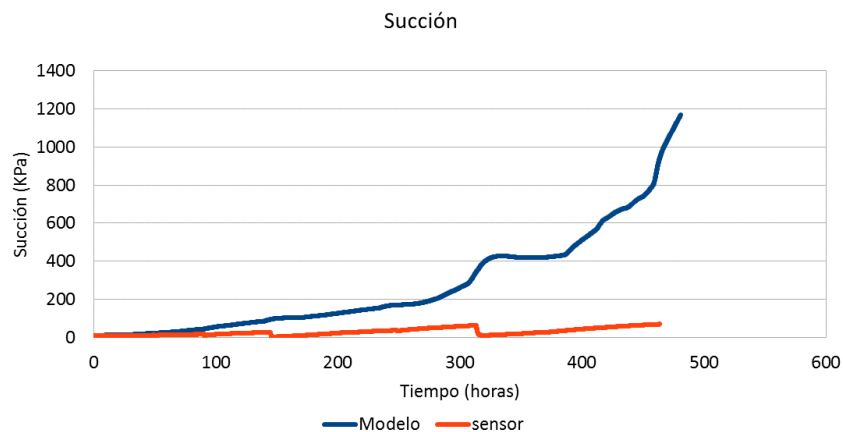


Figura 33. Evolución de la succión para el punto más superficial con la curva de retención nº2.

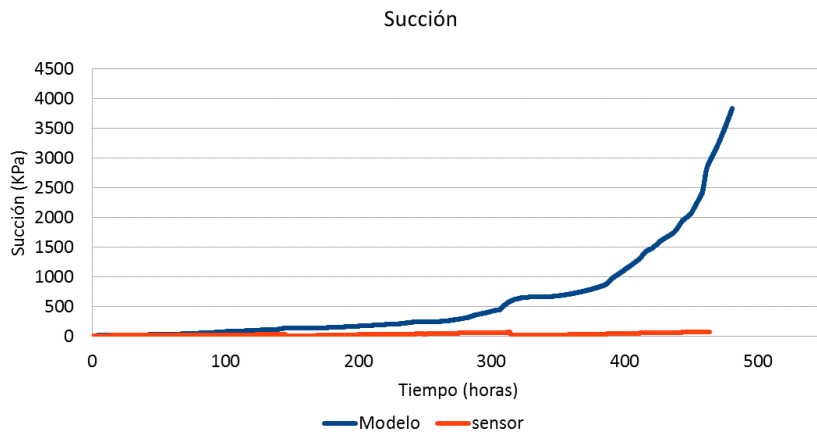


Figura 34. Evolución de la succión para el punto más superficial con la curva de retención nº3.

Vemos que la curva que se ajusta abajo es la que mejor representa los ciclos de humectación y secado que se dan en los datos de laboratorio. Esto se debe a que se trata de una curva más plana, por tanto, pequeños cambios en la succión conllevan grandes cambios en el contenido de agua del terraplén, es más sensible a los cambios de succión.

Con esto podemos concluir que la curva de retención nos va a condicionar mucho nuestro modelo, y no se puede ajustar bien a partir de datos de laboratorio. Por ello sería recomendable medirla in situ.

5.4 Radiación

La radiación controla la evaporación del agua, ya que para que haya un cambio de fase el agua se tiene que calentar, y esta energía sólo la puede obtener de la radiación que le llega. Según **Penman, H.L. (1948)**, toda la radiación se consume en el cambio de fase de agua líquida a agua gas y aunque la realidad es que solo una parte de ella se emplea en este fin, cabe destacar que históricamente se ha reconocido la dependencia de la radiación y la evaporación en este tipo de procesos. El programa calcula una evaporación real dependiendo de los diferentes parámetros de entrada.

El problema con el que nos encontramos en este punto es que solo podemos calcular una radiación a partir de la potencia de los 6 focos de infrarrojos ubicados en la cámara ambiental. Por ello hemos hecho 3 análisis diferentes para ver como varía la succión. En primer lugar, hemos calculado un factor de radiación en función del tiempo que suponemos que están encendidos los focos. Este tiempo lo obtenemos a partir de los datos de la temperatura del laboratorio que podemos ver a continuación.

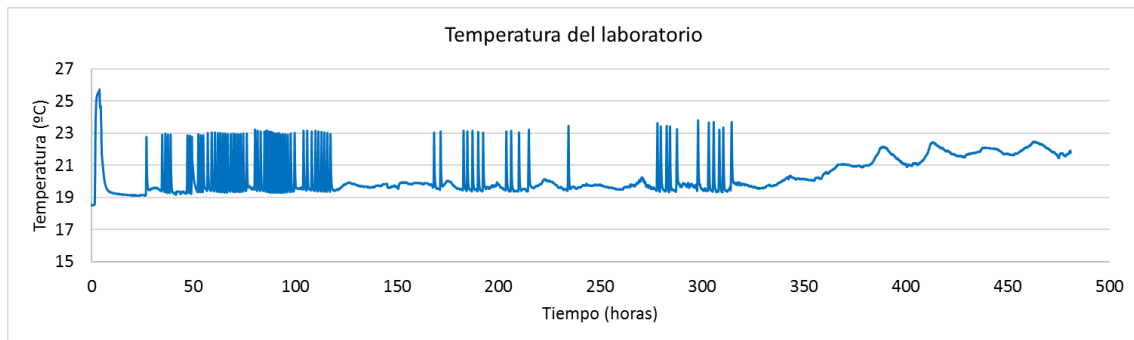


Figura 35. Evolución de la temperatura ambiente del laboratorio durante los 20 días que duró el experimento.

Se ha considerado que las fluctuaciones que se aprecian en la temperatura se deben al encendido y apagado de las lámparas, obteniendo que se encuentran encendidas un 10 % del tiempo que dura el experimento.

Partiendo de este valor, se ha estudiado también el caso de que se encuentre encendidas el 50% del tiempo y el 100%, como podemos apreciar en los casos 4, 3 y 2 respectivamente.

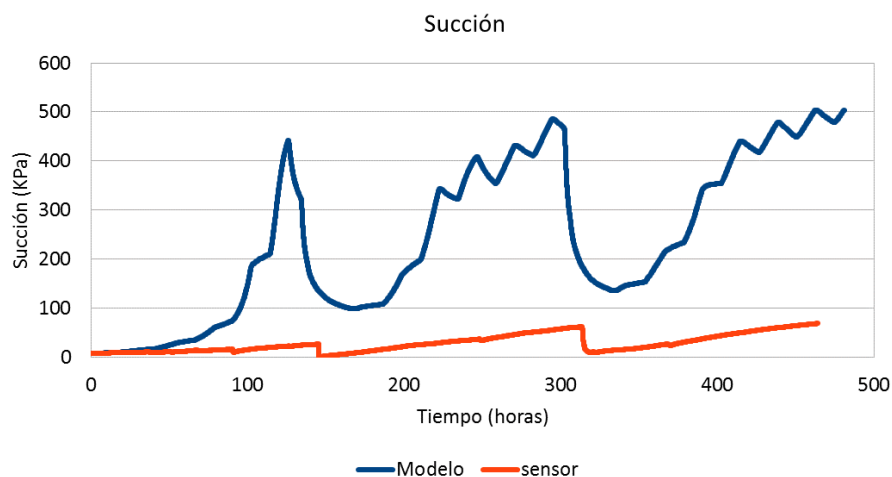


Figura 36. Evolución de la succión para un factor de radiación de 1 (caso 2), considerando que los focos están siempre encendidos, para el punto más superficial.

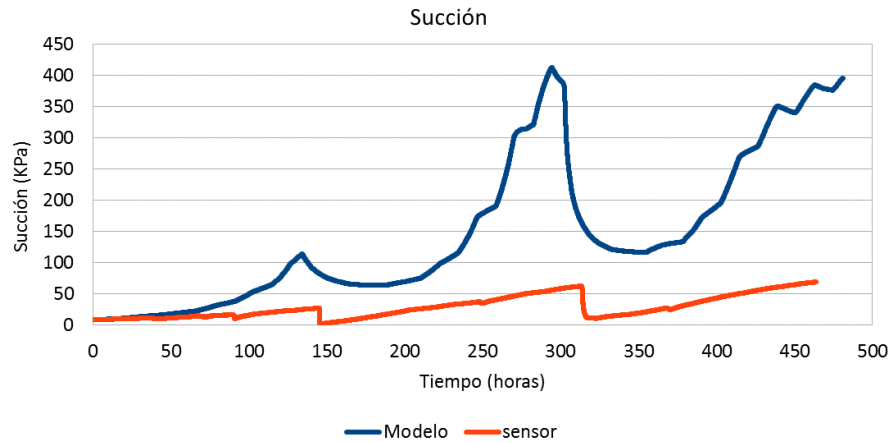


Figura 37. Evolución de la succión para un factor de radiación de 0.5 (caso 3), considerando que los focos están siempre encendidos, para el punto más superficial.

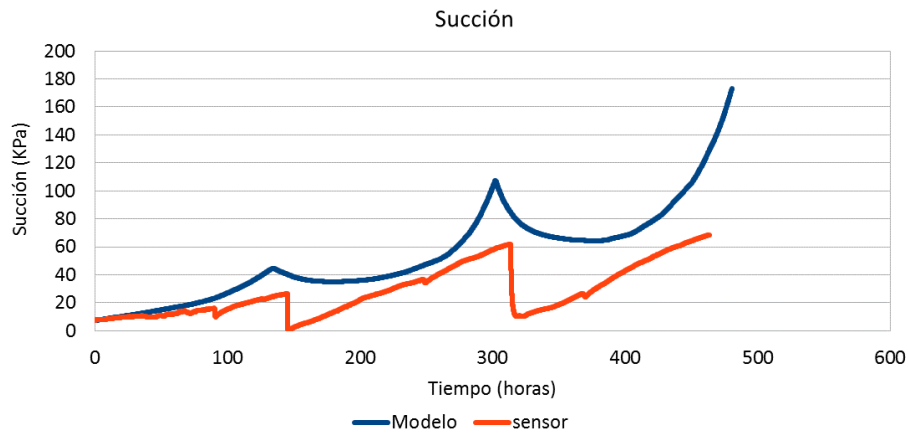


Figura 38. Evolución de la succión para un factor de radiación de 0.1 (Caso 4), considerando que los focos están siempre encendidos, para el punto más superficial.

Se aprecia claramente como la succión decrece considerablemente al disminuir la radiación debido a la disminución de la evaporación.

La temperatura también se ve afectada por este factor de radiación, de forma que disminuye al disminuir el tiempo que están encendidas las lámparas, como cabe esperar.

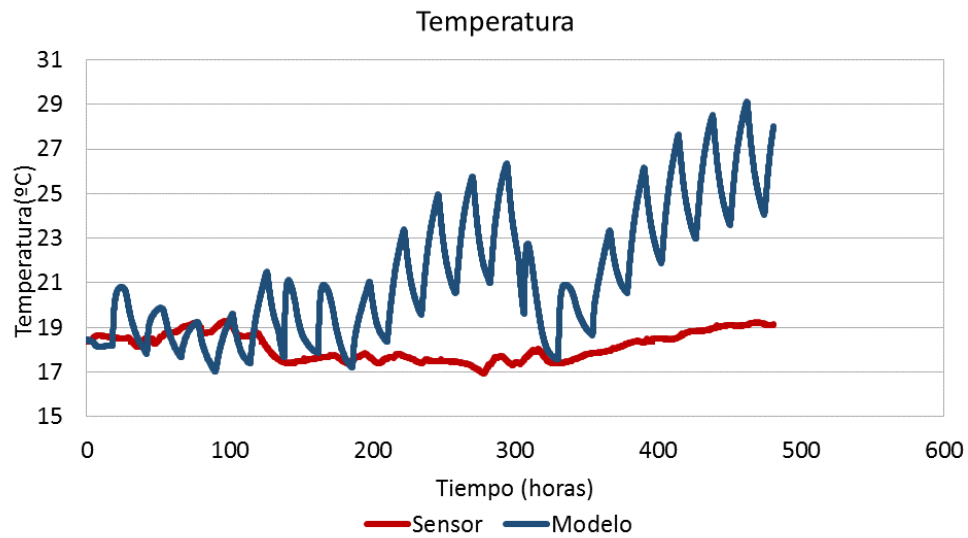


Figura 39. Evolución de la temperatura en el punto más superficial, cuando tenemos las lámparas encendidas el 100% del tiempo (caso 2).

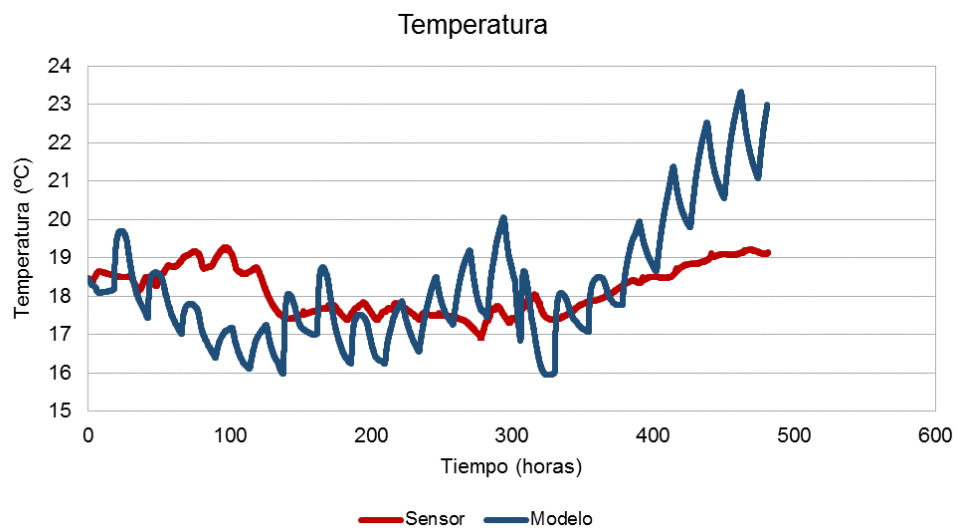


Figura 40. Evolución de la temperatura en el punto más superficial, cuando tenemos las lámparas encendidas el 50% del tiempo (caso 3).

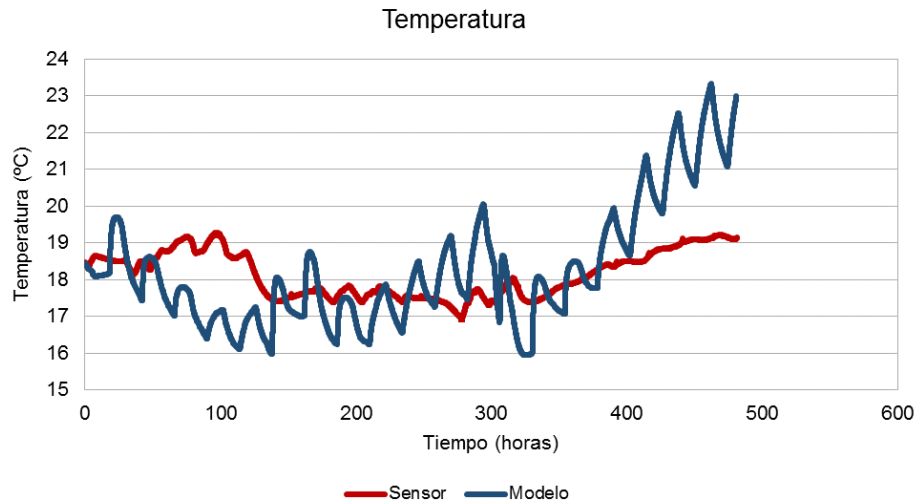


Figura 41. Evolución de la temperatura en el punto más superficial, cuando tenemos las lámparas encendidas el 10% del tiempo (caso 4).

5.5 Ajuste del modelo

Con los cálculos realizados no se ha conseguido un buen ajuste del modelo, pero sí se ha conseguido un caso en el que la succión se puede considerar más ajustada que en los demás. Nos referimos al caso 4, con las siguientes características.

PERMEABILIDAD RELATIVA	CURVA DE RETENCIÓN	RADIACIÓN	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
$2.3 \cdot 10^{-16}$	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 0.1
			1.5-2

Podemos ver como los ciclos de humectación se representan bien en superficie, mientras que pierde esta definición más en profundidad (Anejo 4). Sin embargo, la reacción del suelo ante la precipitación es más lenta de lo que fue en el laboratorio, proceso controlado por la permeabilidad. A partir de este caso se podría seguir calculando, cambiando otros parámetros y a partir de una curva de retención medida in situ, para conseguir un modelo más representativo de los datos del laboratorio.

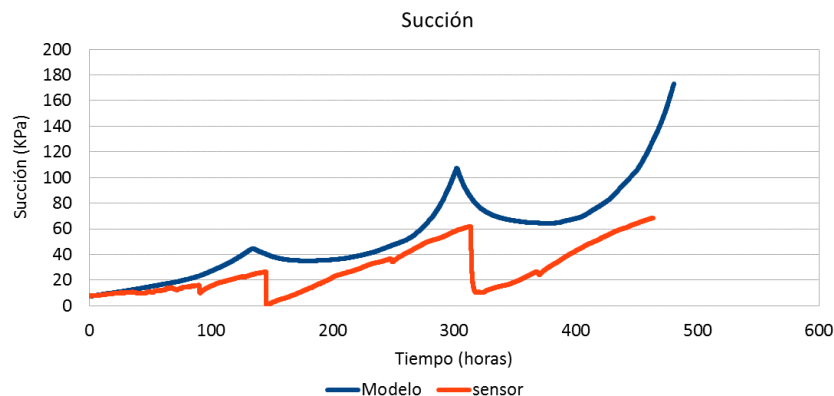


Figura 42. Succión en el punto más superficial para el caso 4

En las gráficas de la temperatura se observa que ésta queda por debajo de la medida en todo momento, y se pueden distinguir unos ciclos diarios, que se supone están relacionados con la temperatura del laboratorio durante el día y la noche. Estos ciclos van desapareciendo conforme aumenta la profundidad hasta ser imperceptibles en el punto más profundo. Se pueden apreciar las variaciones entre el día y la noche en la figura 37 donde se representa la temperatura del laboratorio durante todo el experimento.

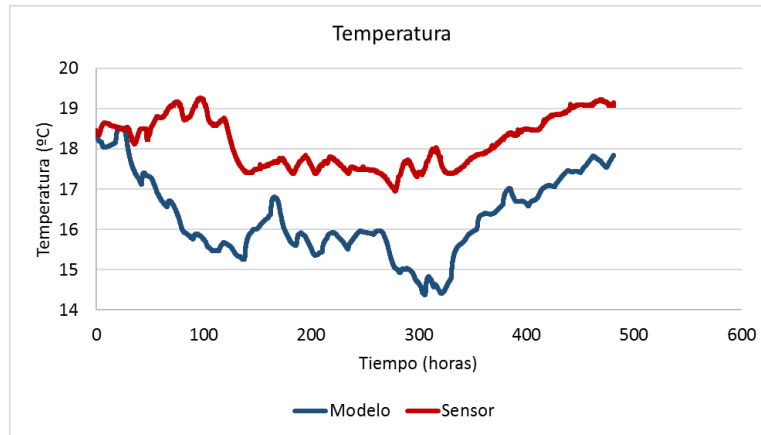


Figura 43. Evolución de la temperatura en el punto más superficial para el caso 4

Capítulo 6. Conclusiones.

Con base a un ensayo realizado a escala en un laboratorio en Escocia se ha estudiado el efecto de las variables climáticas sobre los cambios de humedad en un terraplén debido a las acciones climáticas (precipitaciones, radiación solar, viento).

Para ello se ha utilizado un modelo Termo-hidráulico acoplado con una condición específica para aplicar una acción climática, consistente con la formulación en el continuo, es decir, cada condición de flujo en el contorno, ya sea de masa o calor, tiene en el continuo una resolución mediante una ecuación de balance.

Podemos obtener las siguientes conclusiones del estudio realizado:

- La radiación controla la evaporación, de forma que para pasar de agua líquida a vapor de agua el calor necesario se extrae de la radiación.
- La permeabilidad controla la infiltración. Suelos más permeables permitirán que el agua se infiltre más rápido, mientras que el proceso de secado vendrá más controlado por la evaporación, es decir, por la radiación.
- La cura de retención es una ley hidráulica central. Fija los flujos de agua líquida y vapor. Para hacer buenas predicciones se recomienda estimarla in-situ, midiendo tanto la succión como el contenido de agua en los mismos puntos o lo más cercanos entre ellos posibles.

En líneas futuras, se identifica que:

- Se podría realizar un análisis más detallado con mallas más finas que la utilizada en este trabajo.
- Una vez calibrado el modelo se podrían aplicar escenarios de cambio climático y ver la posible respuesta a largo plazo de estas estructuras.
- Un acoplamiento mecánico nos permitiría además ver la posible fisuración ante los cambios climáticos y la respuesta de los diques en Inglaterra que se pretenden estudiar.

Bibliografía

- Brooks, R.H., and A.T. Corey. (1964).** Hydraulic properties of porous media. Hydrol. Pap. no. 3. Colorado State Univ., Fort Collins, CO.
- Burdine, N.T. (1953).** Relative permeability calculations from pore-size distribution data. Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng. Vol. 198, pp. 71-77.
- Coutinho, R. (2012).** Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4: Proceedings of the Fourth International Conference on Site Characterization ISC-4, Porto de Galinhas - Pernambuco, Brasil, 17-21
- Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica (2010).** *CODE_BRIGHT User's Guide*. Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelona Tech. España.
- Mualem, Y. (1976).** A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 12:513-522.
- Noilan, J; Planton, S. (1989).** A Simple Parameterization of land Surface Processes for Meteorological Models. Montly Weather Review, Vol. 117, pp: 536 – 549.
- Olivella, S; Carrera, J; Gens, A; Alonso, E. (1994).** Non-isothermal Multiphase Flow of Brine and Gas Through Saline Media. Transport in Porous Media, Vol. 15, pp. 271-293.
- Olivella, S; Gens, A; Carrera, J; Alonso, E. (1996).** Numerical Formulation for a Simulator (CODE_BRIGHT) for The Coupled Analysis of Saline Media. Engineering Computations, Vol. 13, No 7, pp. 87-112.
- Penman, H.L. (1948).** *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proc. Roy. Soc. London A (194), S. 120-145.
- Purushothama, P. (2008).** Soil mechanics & foundation engineering. Dorling Kindersley, India. pp. 116
- Terzaghi, K; Peck, R; Mesri, G. (1996).** Soil mechanics in engineering practice. John Wiley & sons. 3era edición, pp. 95-96
- Van Genuchten, M.Th., F.J. Leij, and S.R. Yates. (1991).** The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Res. Rep. 600 2.91 065. USEPA, Ada, OK.
- Van Genuchten, R. (1980).** *A Closed - Form Equation for Predicting The Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils*. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 49, pp. 892-898. 68

Van Genuchten, R. (1978). Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model. Res. Rep. 78-WR-08. Princeton Univ., Princeton, NJ.

Zielinski, M; Sanchez, M; Romero, E; Sentenac, P. (2011). Assessment of water retention behaviour in compacted fills, Geotechnical Engineering Volume 164 Issue GE2.

Anejos

ANEJO 0: CASOS DE ESTUDIO.

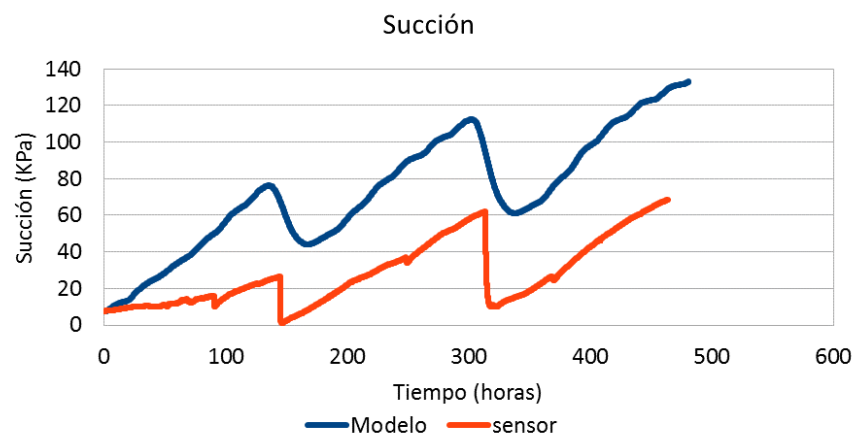
	PERMEABILIDAD INTRÍNSECA	CURVA DE RETENCIÓN		RADIACIÓN	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
CASO 1	10^{-15}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 1.0	1.5-2
CASO 2	$2.3 \cdot 10^{-16}$	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 1.0	1.5-2
CASO 3	$2.3 \cdot 10^{-16}$	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 0.5	1.5-2
CASO 4	$2.3 \cdot 10^{-16}$	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 0.1	1.5-2
CASO 5	10^{-15}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	RADIACIÓN REAL	1.5-2
CASO 6	10^{-15}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.23$	RADIACIÓN REAL	1.5-2
CASO 7	10^{-15}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.3$	RADIACIÓN REAL	1.5-2
CASO 8	10^{-16}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 0.1	2-2.5
CASO 9	10^{-16}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 0.1	2.5-3

ANEJO 1: RESULTADOS CASO 1.

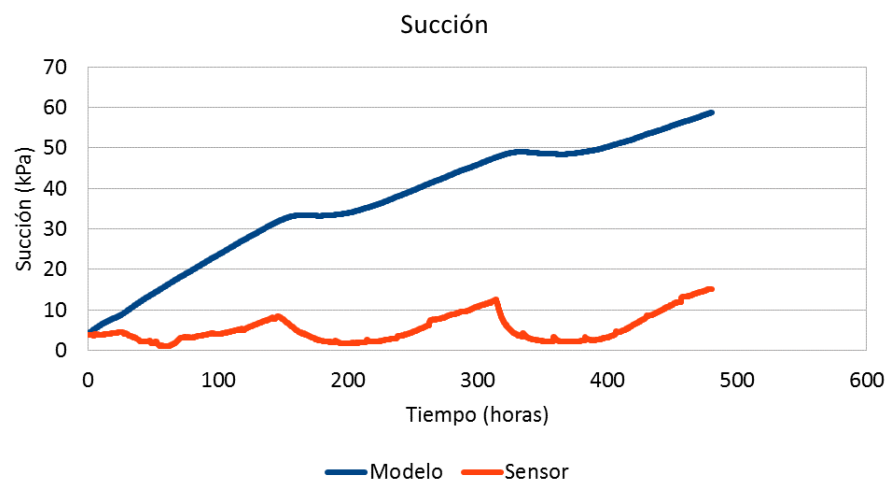
PERMEABILIDAD RELATIVA	CURVA DE RETENCIÓN		RADIACIÓN	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
10^{-15}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 1.0	1.5-2

Evolución de la succión:

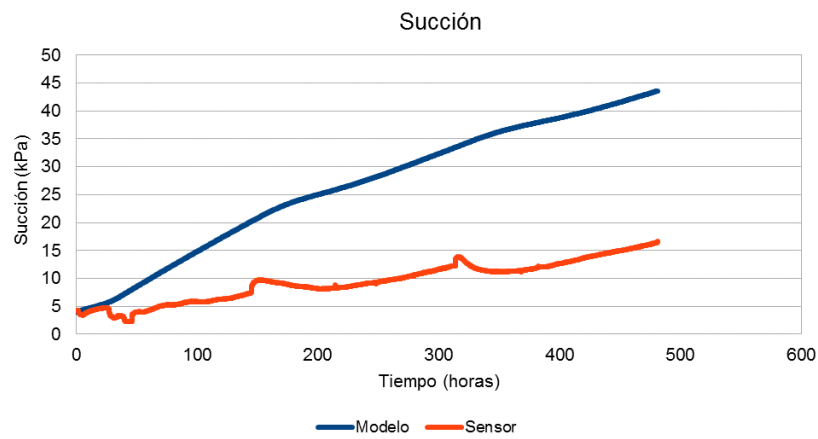
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



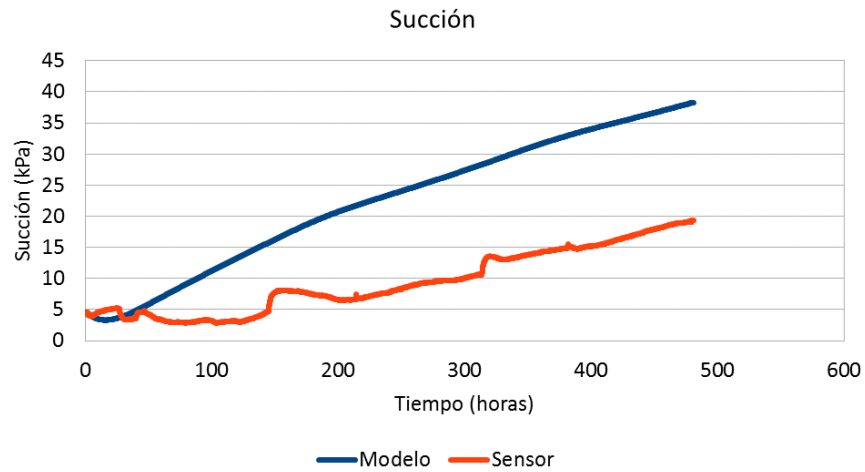
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad

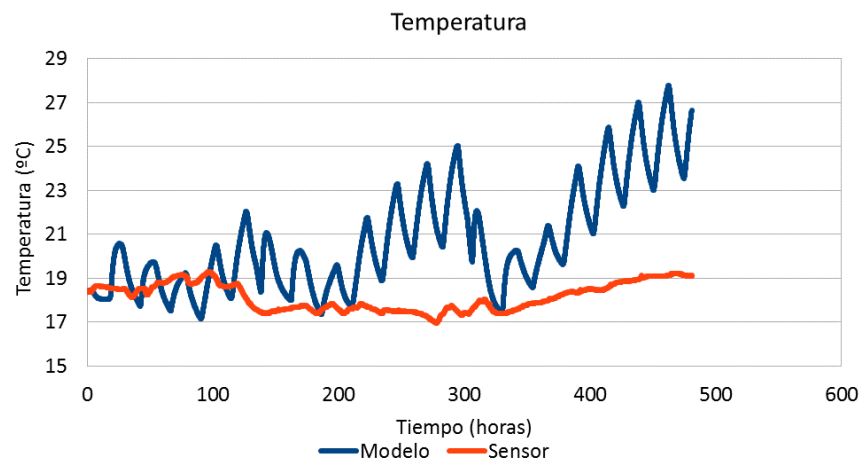


Punto situado a 0.8 metros de profundidad

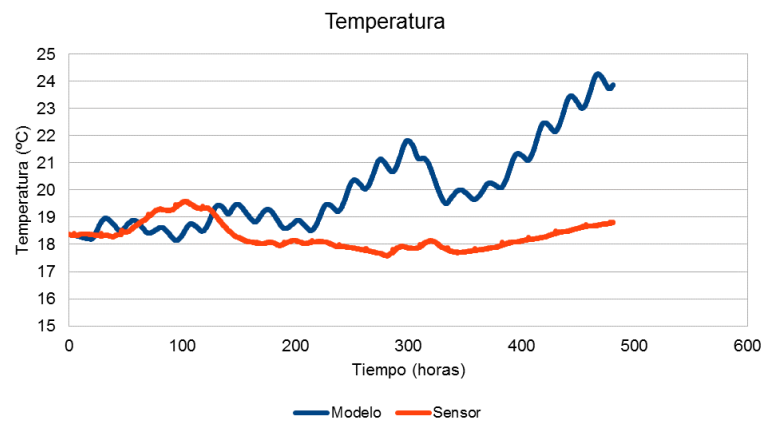


Evolución de la temperatura:

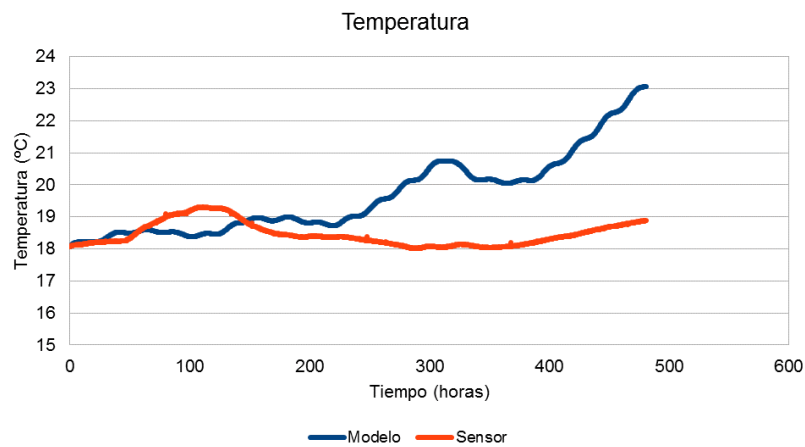
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



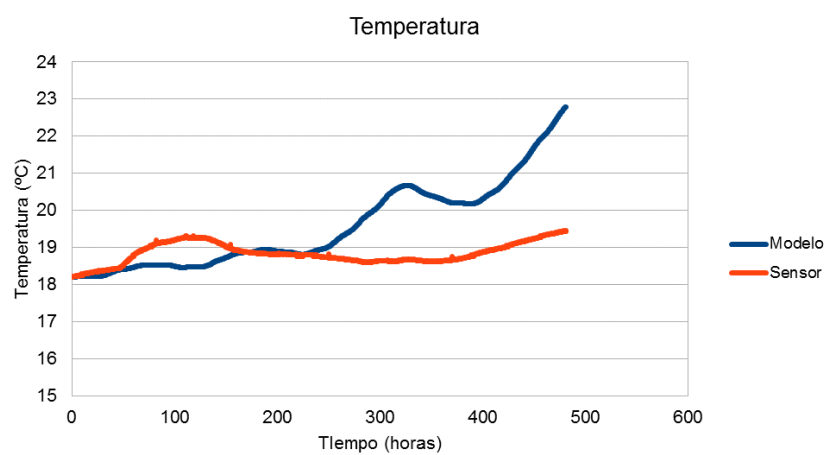
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad



Punto situado a 0.8 metros de profundidad

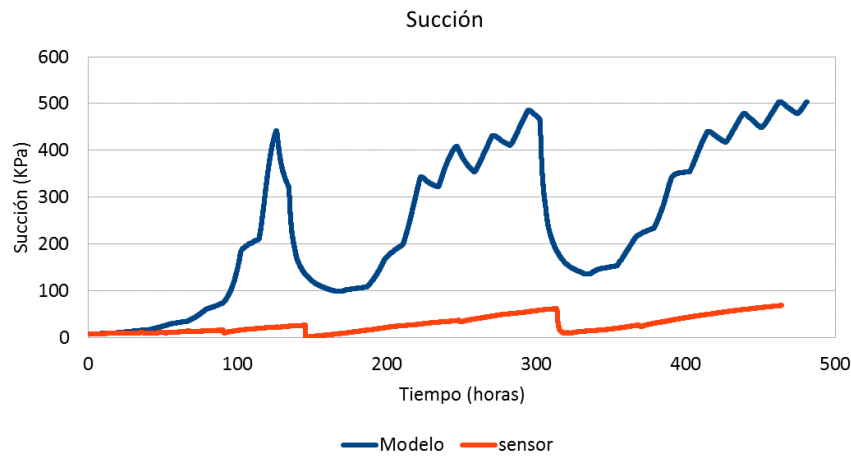


ANEJO 2: RESULTADOS CASO 2.

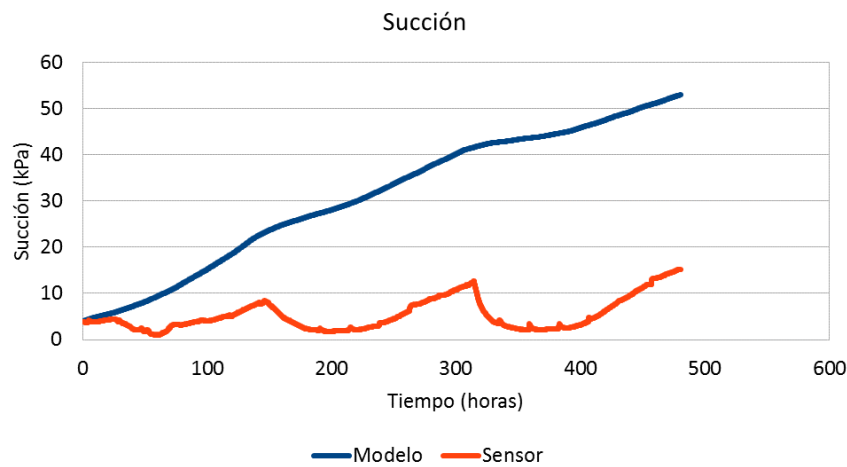
PERMEABILIDAD RELATIVA	CURVA DE RETENCIÓN		RADIACIÓN	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
$2.3 \cdot 10^{-16}$	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 1.0	1.5-2

Evolución de la succión:

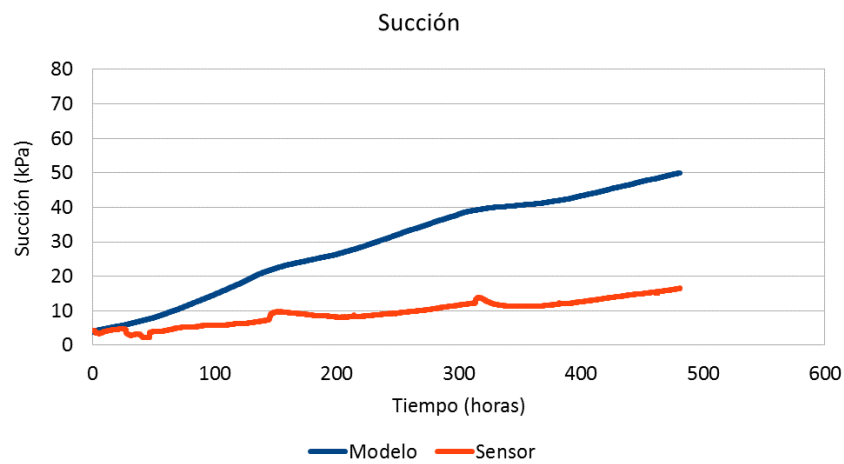
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



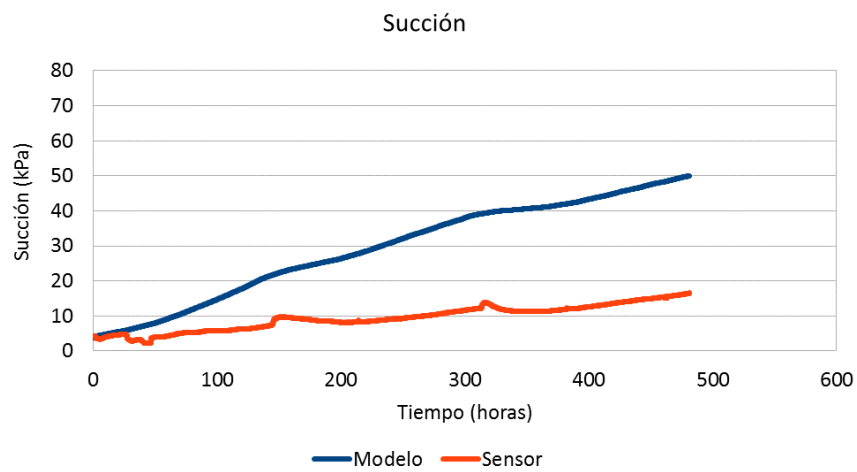
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad

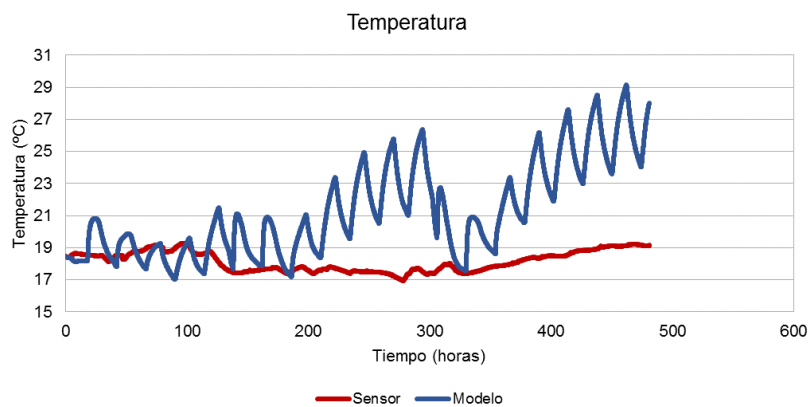


Punto situado a 0.8 metros de profundidad

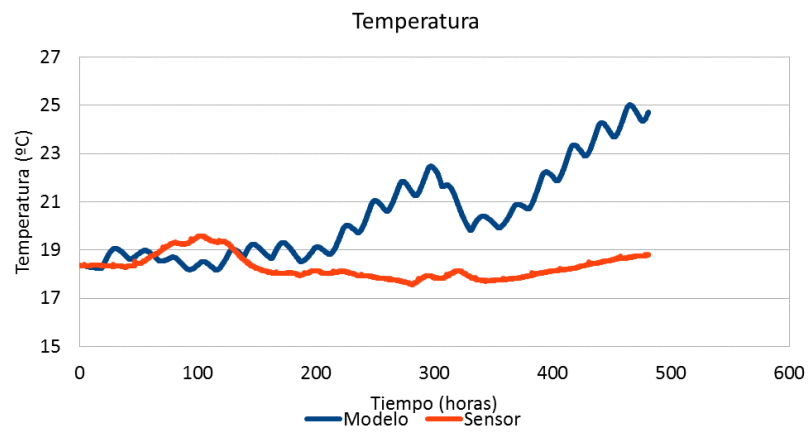


Evolución de la temperatura:

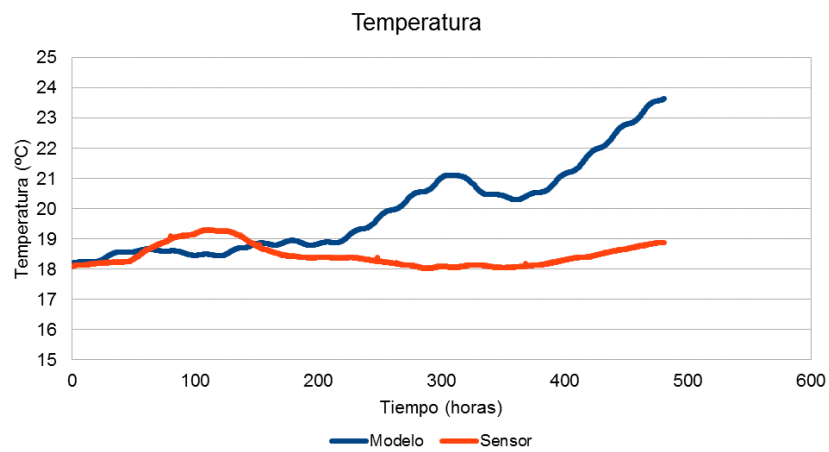
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



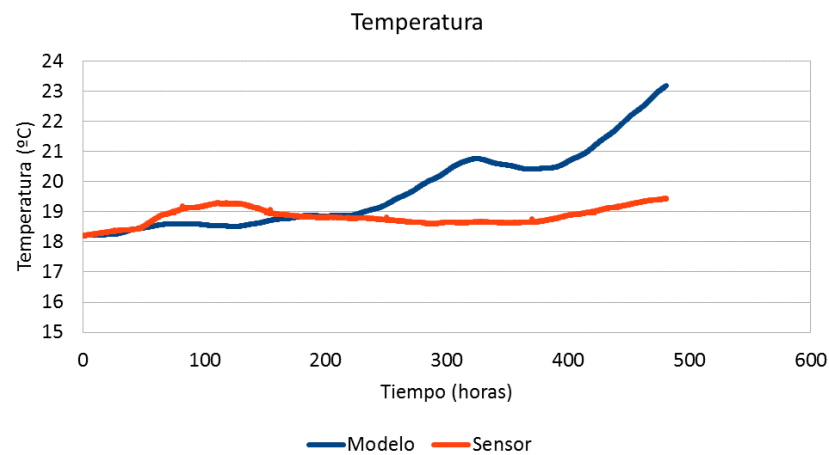
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad



Punto situado a 0.8 metros de profundidad

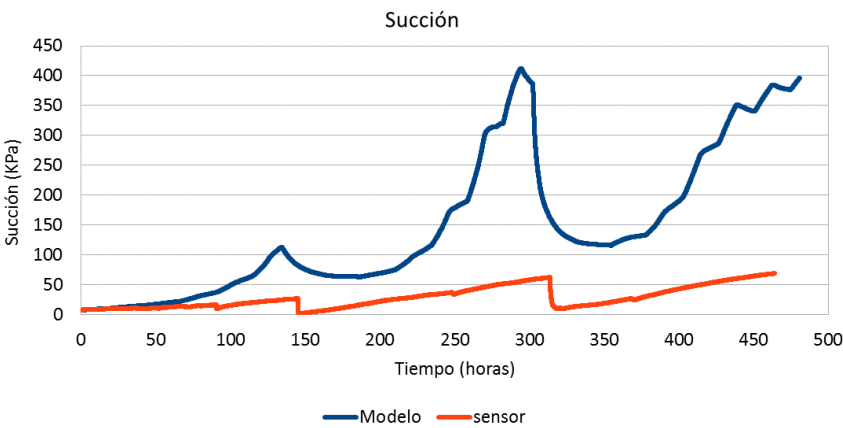


ANEJO 3: RESULTADOS CASO 3.

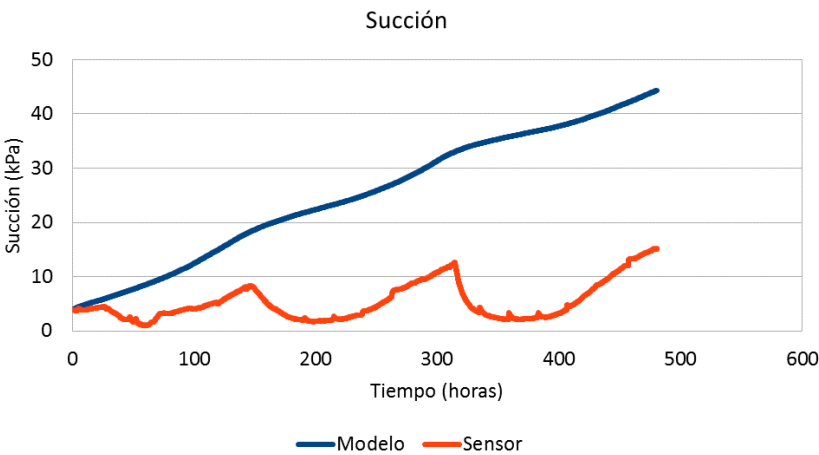
PERMEABILIDAD RELATIVA	CURVA DE RETENCIÓN		RADIACIÓN	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
$2.3 \cdot 10^{-16}$	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 0.5	1.5-2

Evolución de la succión:

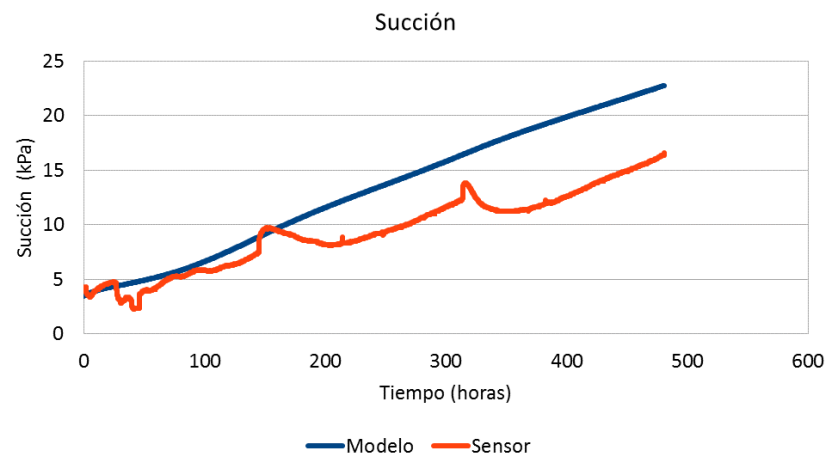
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



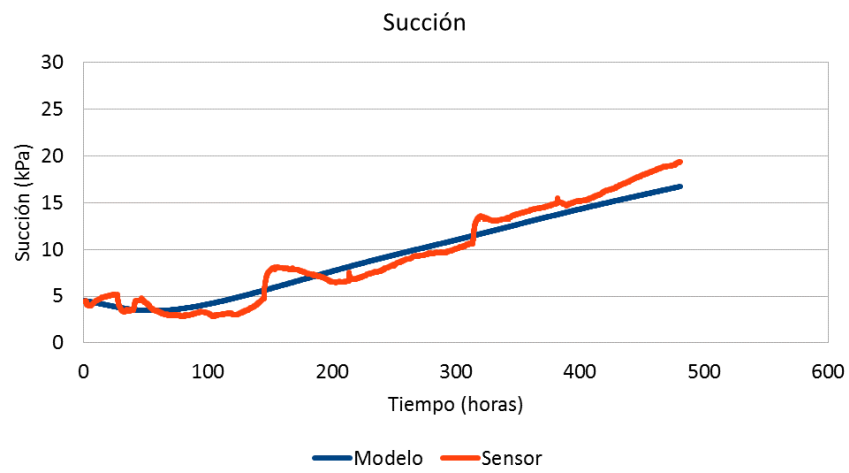
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad

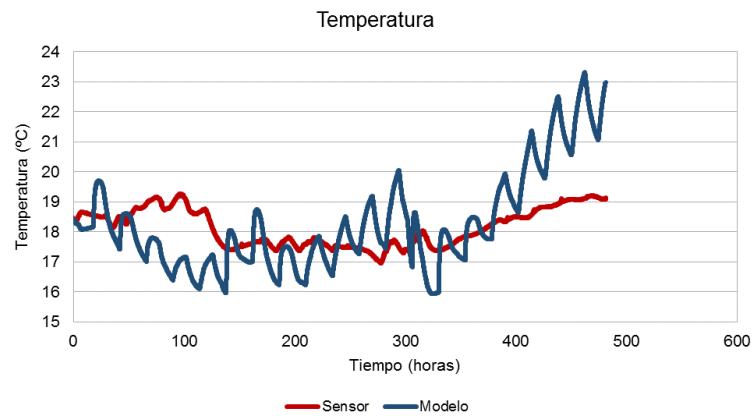


Punto situado a 0.8 metros de profundidad

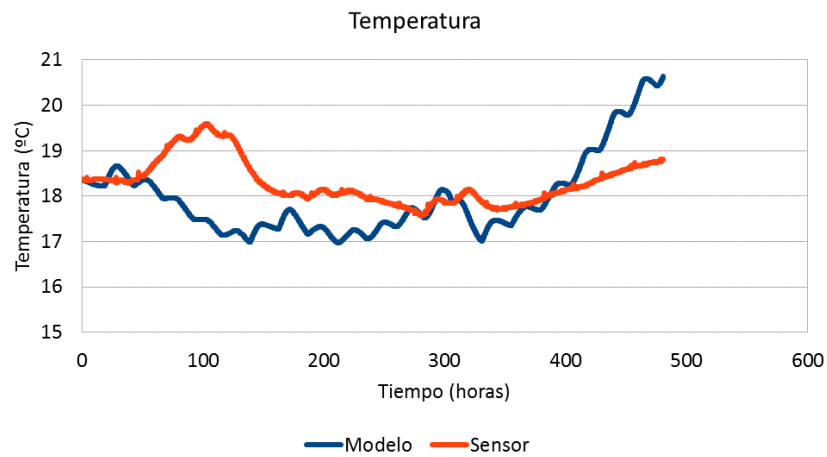


Evolución de la temperatura:

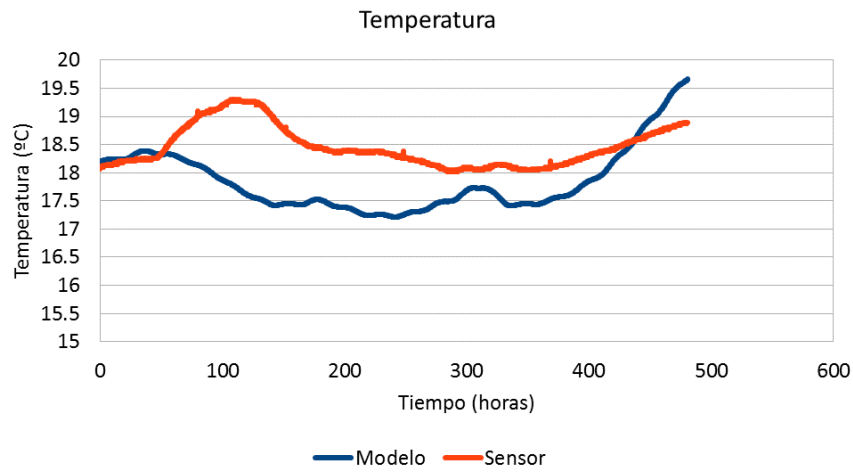
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



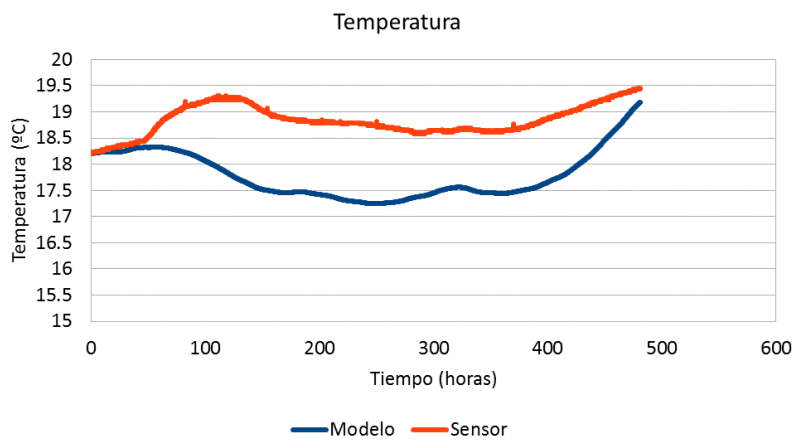
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad



Punto situado a 0.8 metros de profundidad

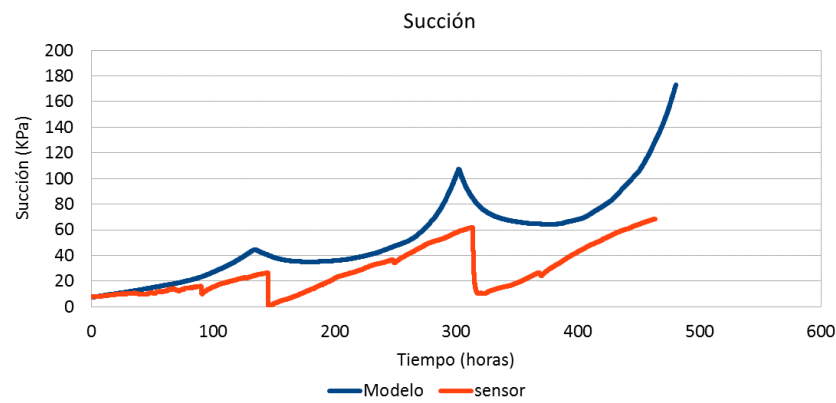


ANEJO 4: RESULTADOS CASO 4.

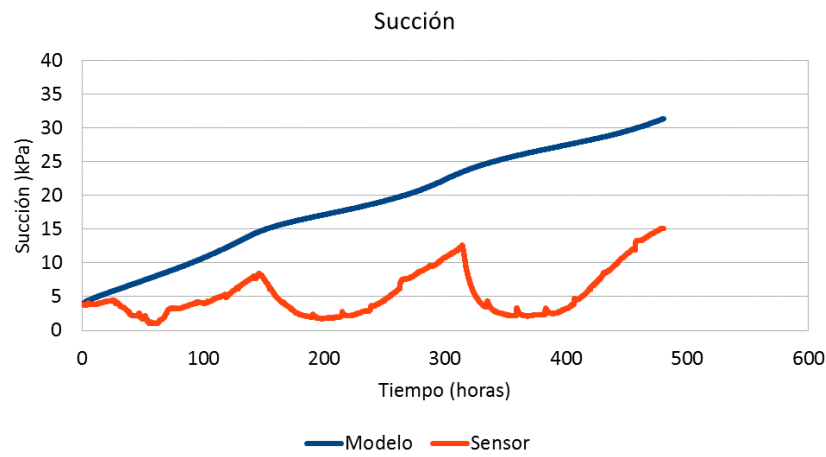
PERMEABILIDAD RELATIVA	CURVA DE RETENCIÓN		RADIACIÓN	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
$2.3 \cdot 10^{-16}$	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 0.1	1.5-2

Evolución de la succión:

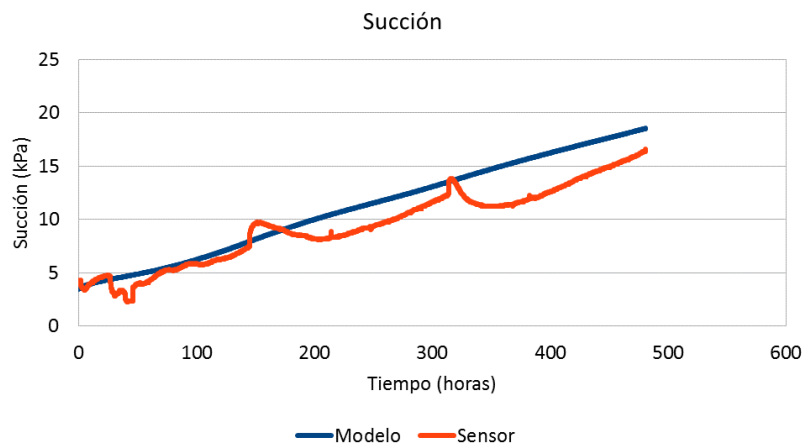
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



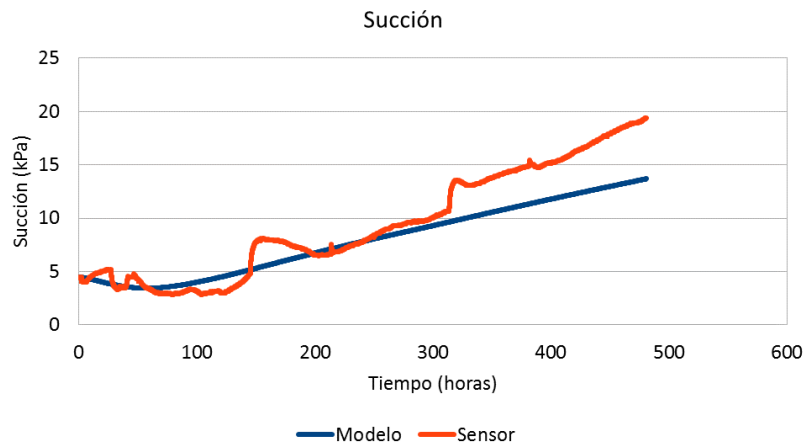
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad

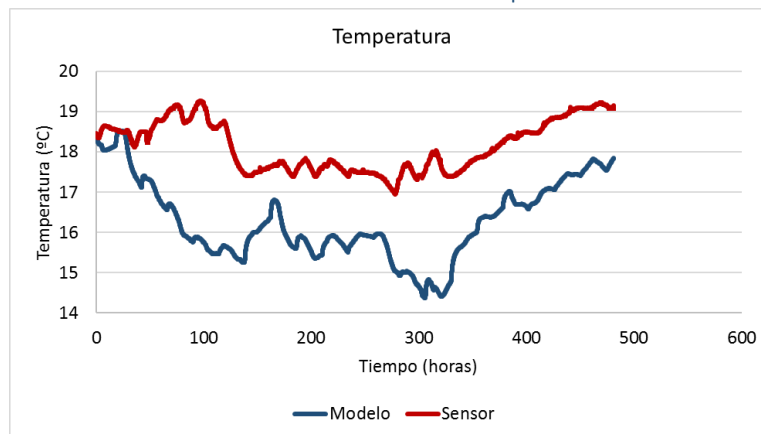


Punto situado a 0.8 metros de profundidad

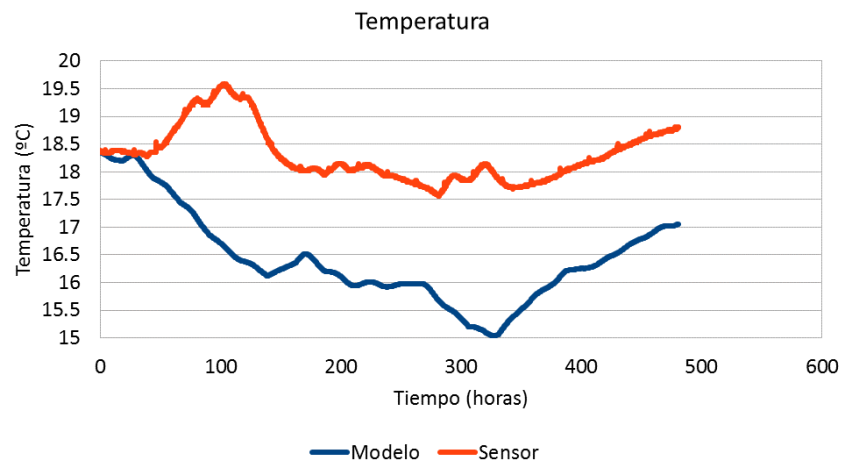


Evolución de la temperatura:

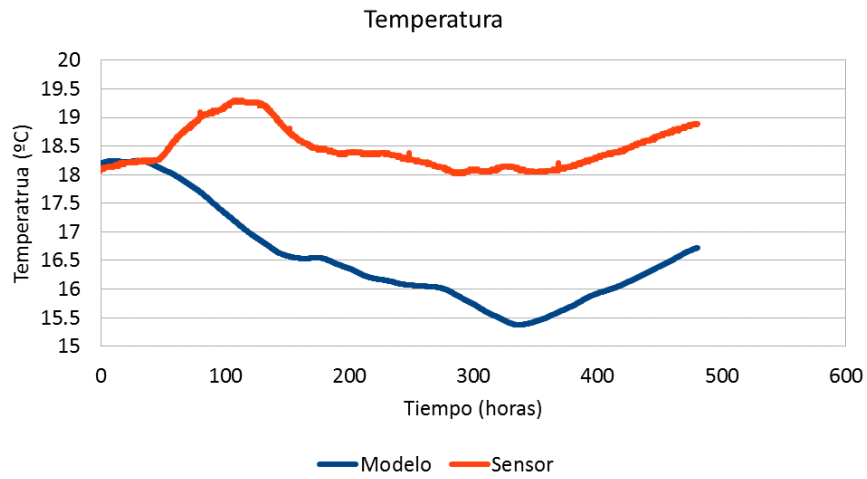
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



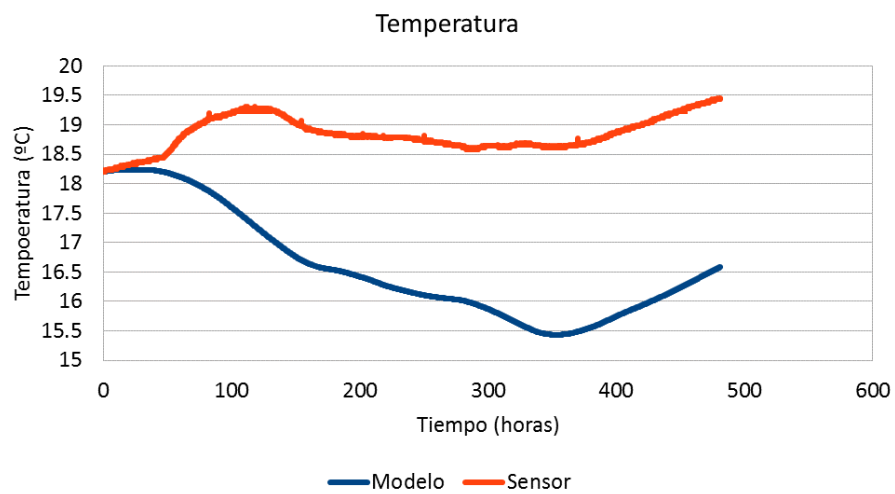
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad



Punto situado a 0.8 metros de profundidad

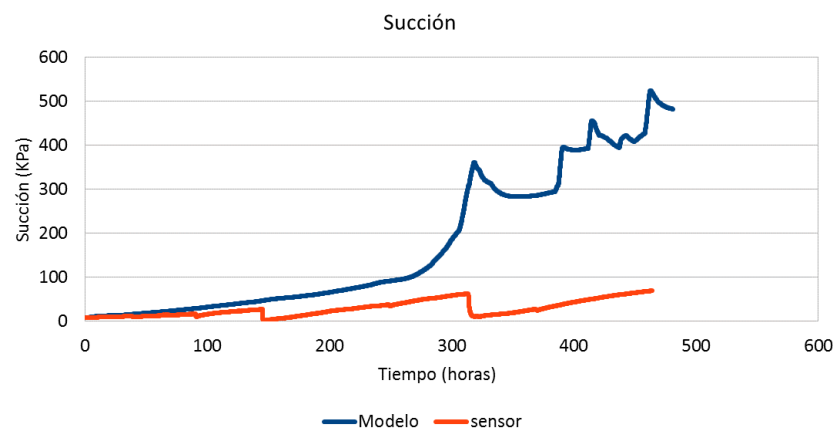


ANEJO 5: RESULTADOS CASO 5.

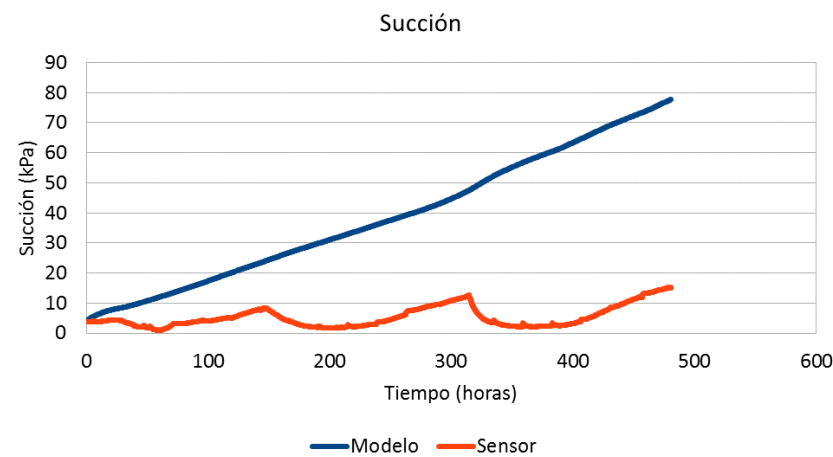
PERMEABILIDAD RELATIVA	CURVA DE RETENCIÓN		RADIACIÓN	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
10^{-15}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	RADIACIÓN REAL	1.5-2

Evolución de la succión:

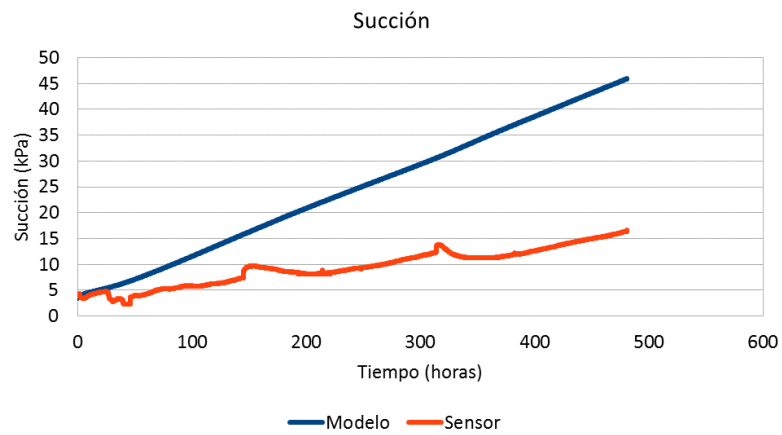
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



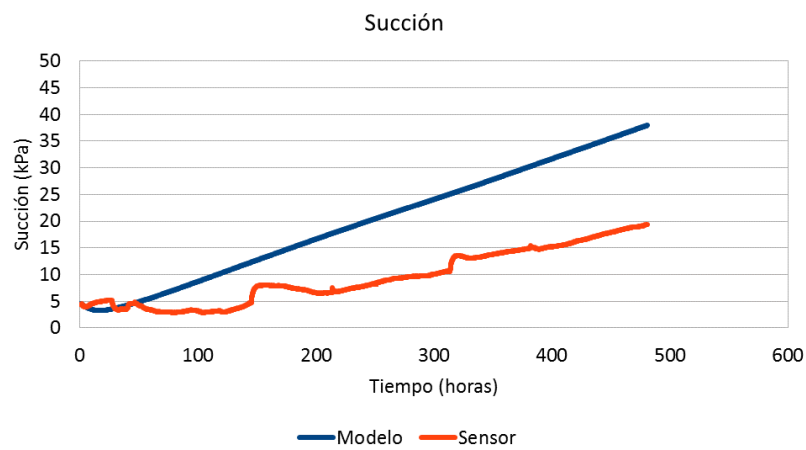
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad

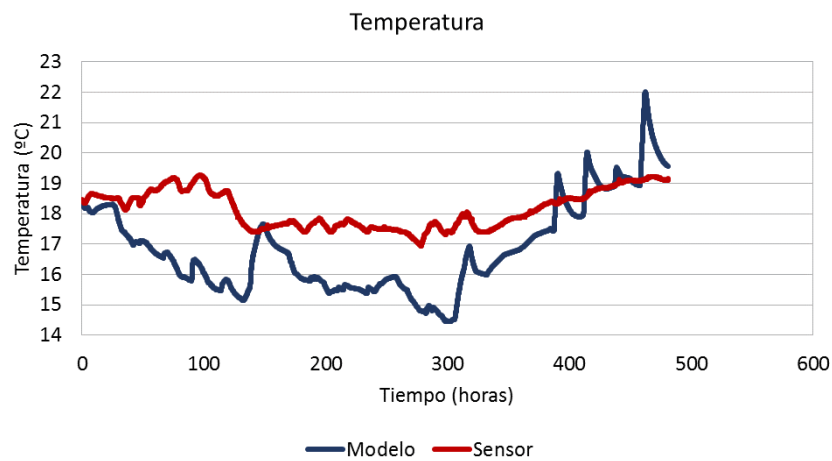


Punto situado a 0.8 metros de profundidad

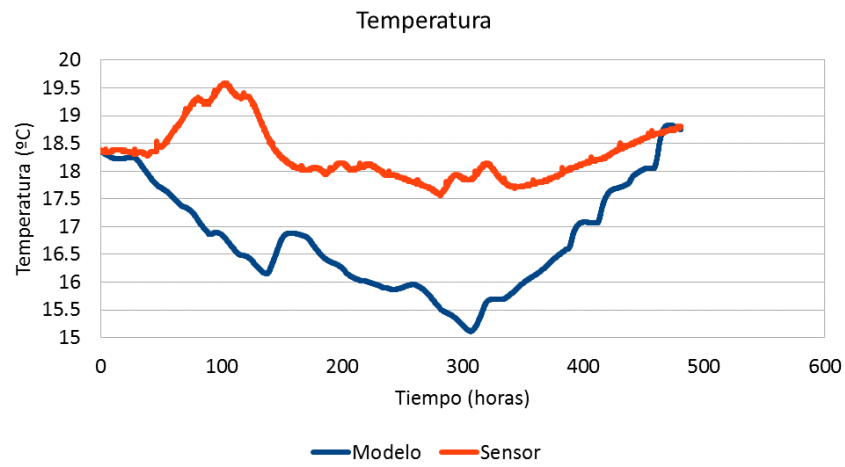


Evolución de la temperatura:

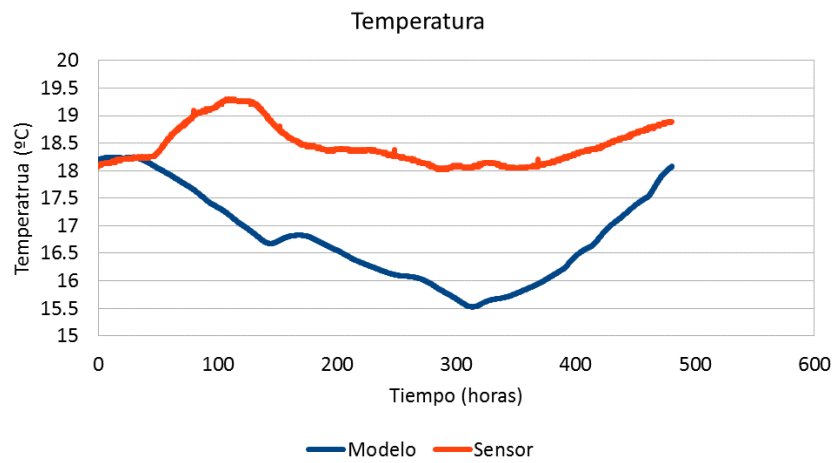
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



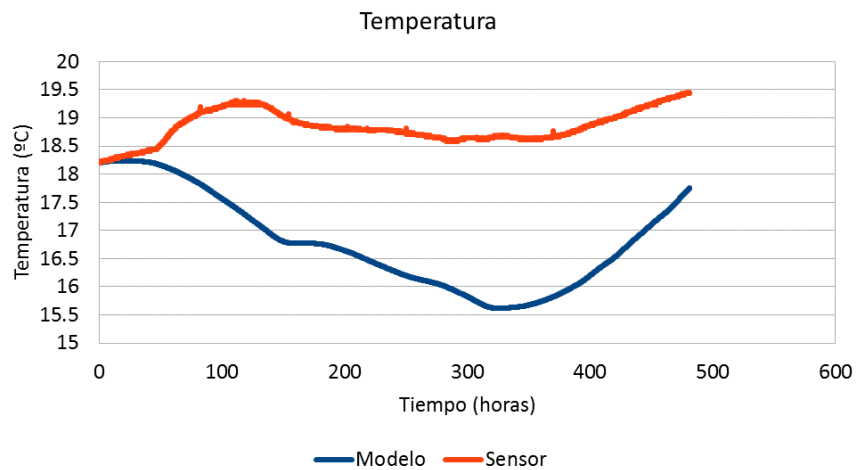
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad



Punto situado a 0.8 metros de profundidad

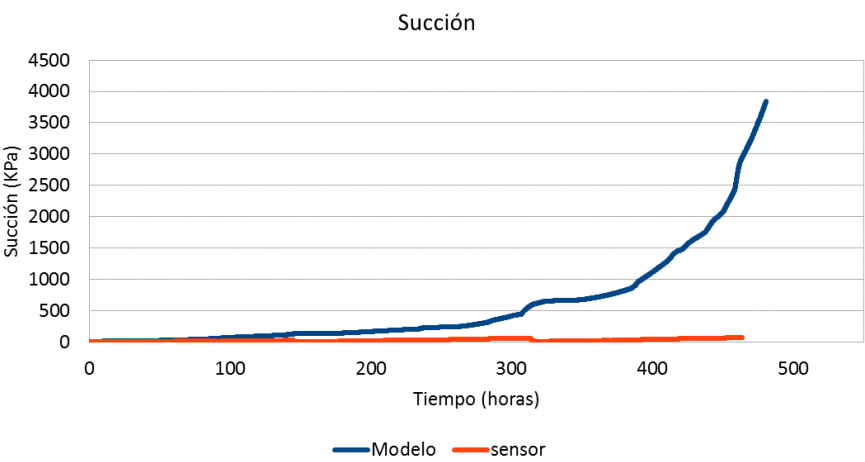


ANEJO 6: RESULTADOS CASO 6.

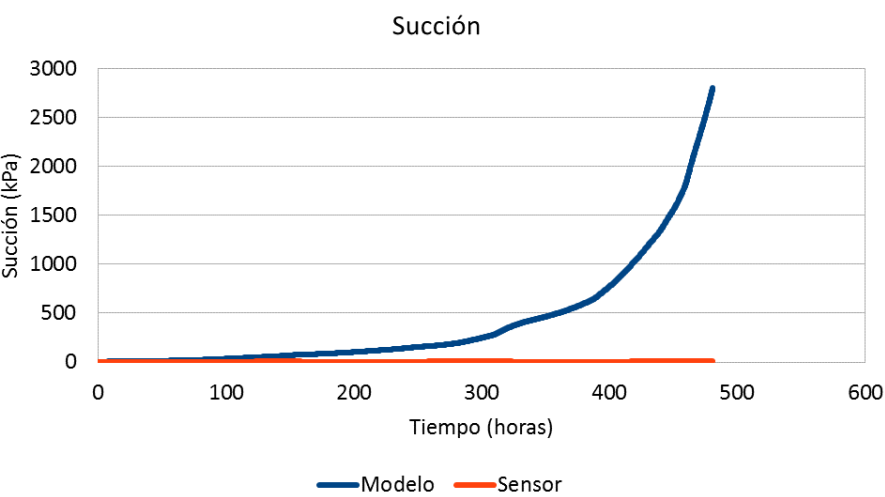
PERMEABILIDAD RELATIVA	CURVA DE RETENCIÓN		RADIACIÓN	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
10^{-15}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.23$	RADIACIÓN REAL	1.5-2

Evolución de la succión:

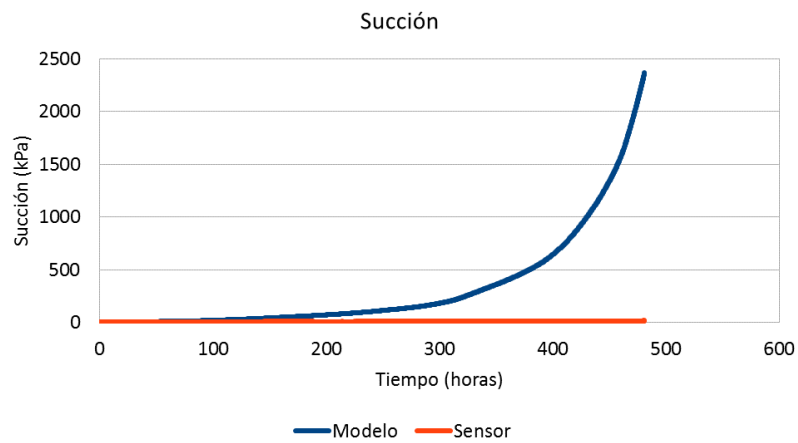
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



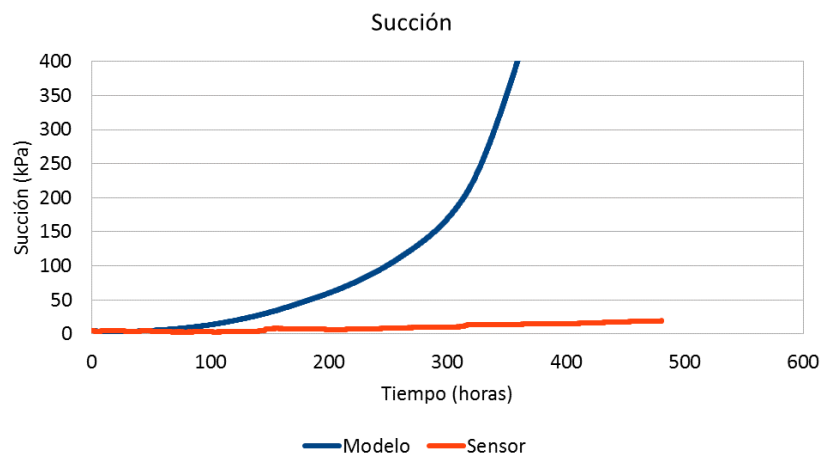
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad

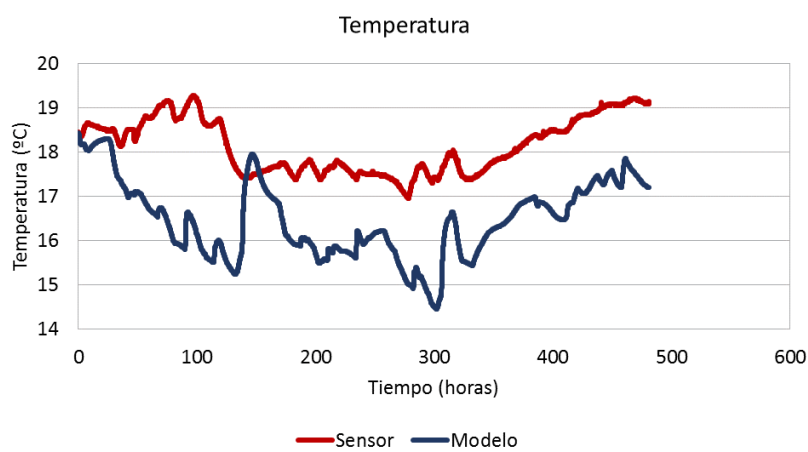


Punto situado a 0.8 metros de profundidad

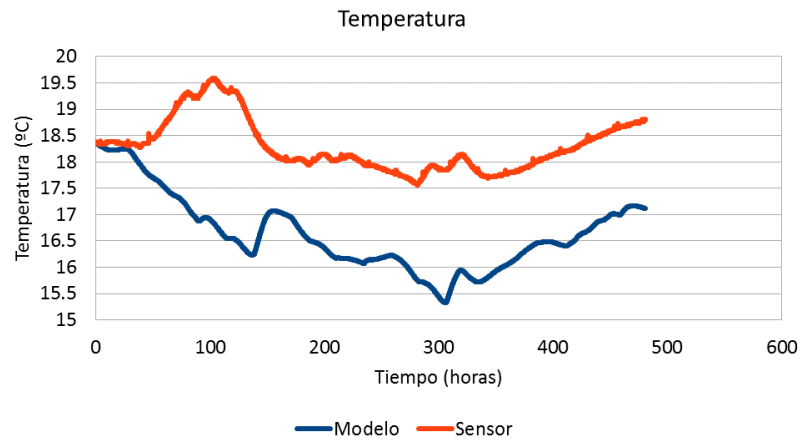


Evolución de la temperatura:

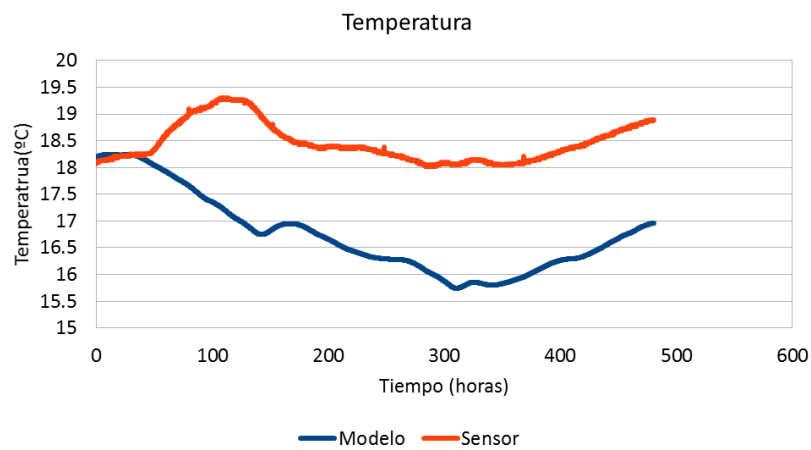
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



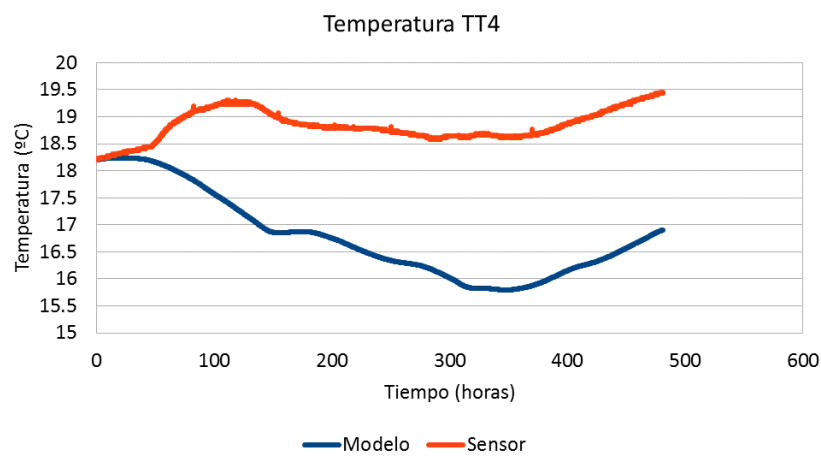
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad



Punto situado a 0.8 metros de profundidad

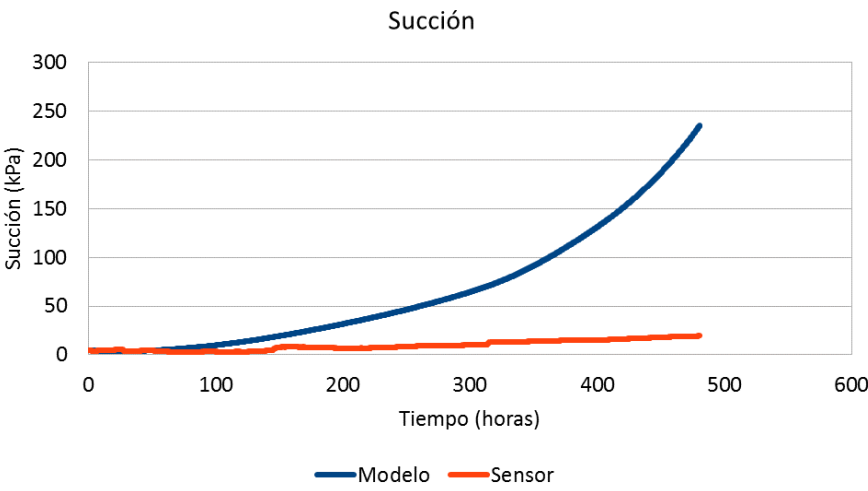


ANEJO 7: RESULTADOS CASO 7.

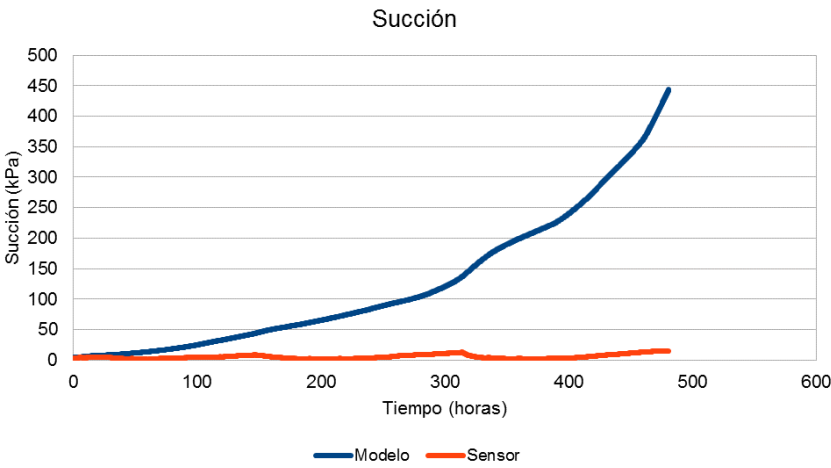
PERMEABILIDAD RELATIVA	CURVA DE RETENCIÓN		RADIACIÓN	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
10^{-15}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.3$	RADIACIÓN REAL	1.5-2

Evolución de la succión:

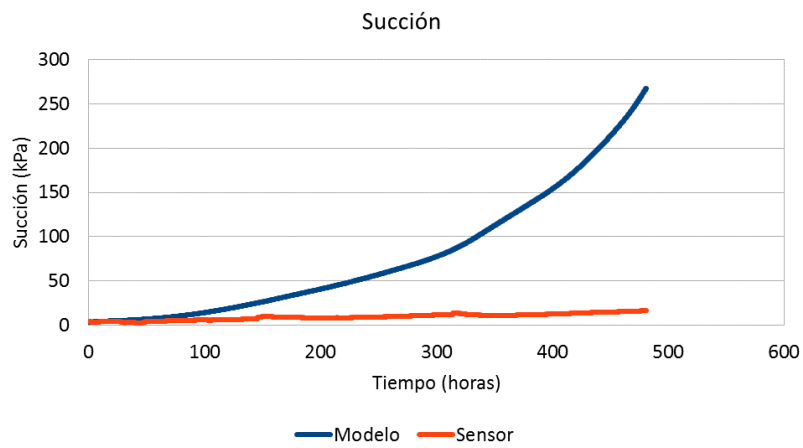
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



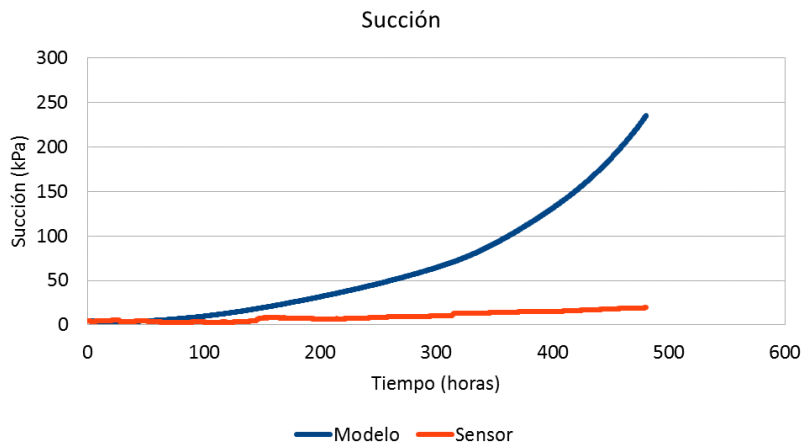
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad

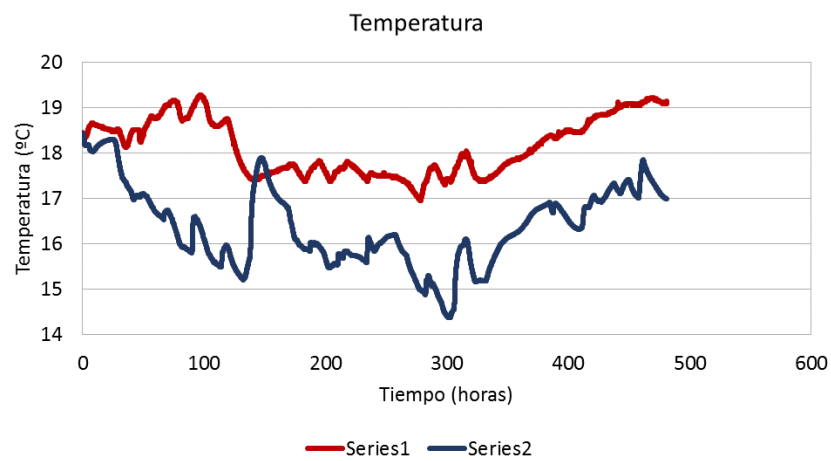


Punto situado a 0.8 metros de profundidad

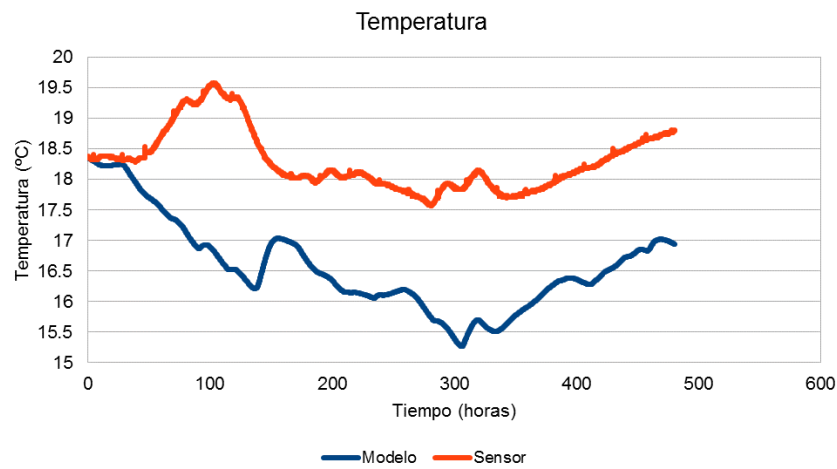


Evolución de la temperatura:

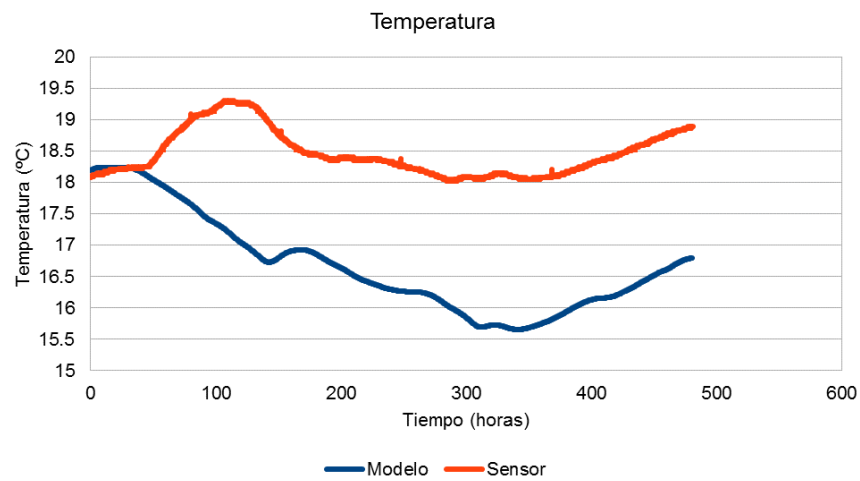
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



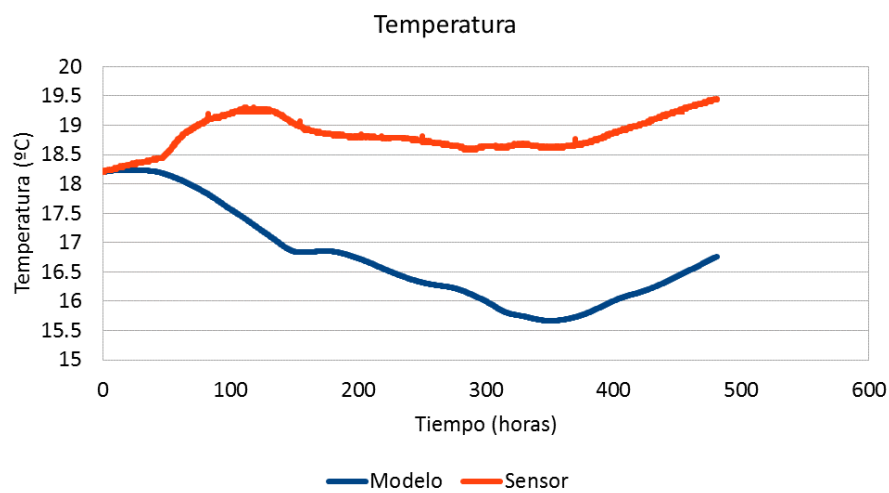
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad



Punto situado a 0.8 metros de profundidad

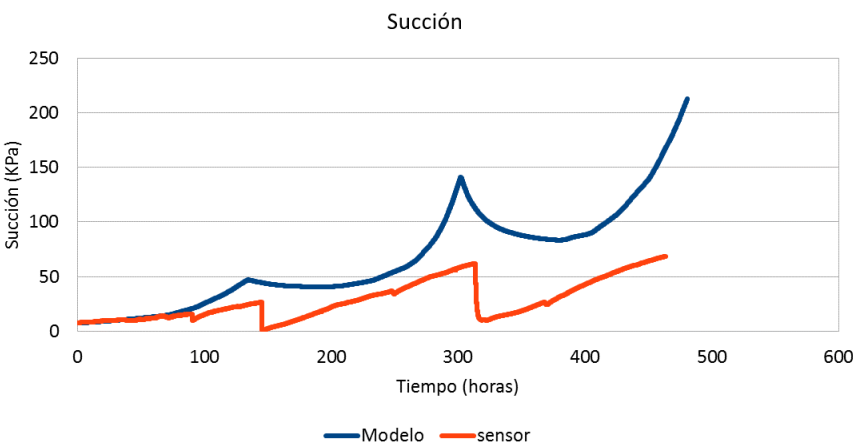


ANEJO 8: RESULTADOS CASO 8.

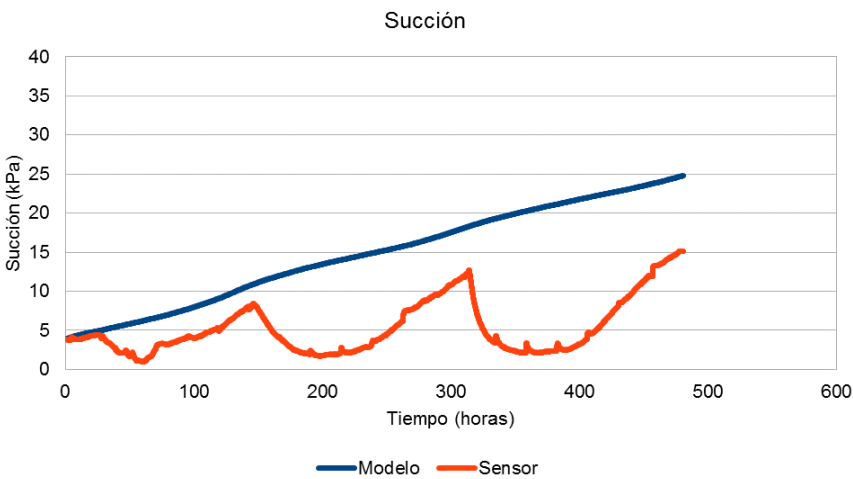
PERMEABILIDAD RELATIVA	CURVA DE RETENCIÓN		RADIACIÓN	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
10^{-16}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 0.1	2-2.5

Evolución de la succión:

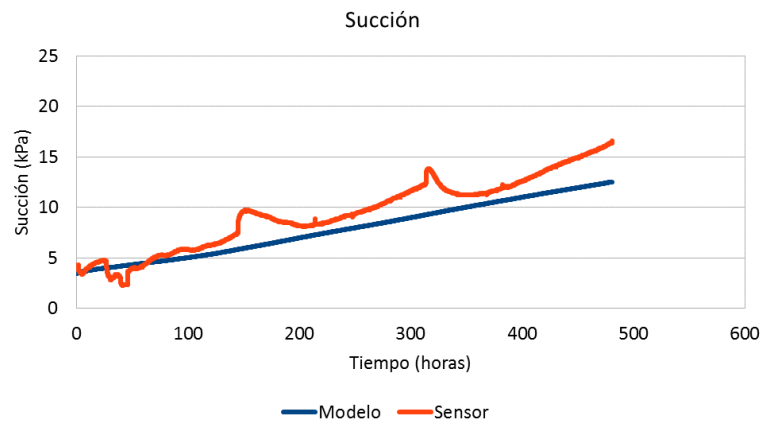
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



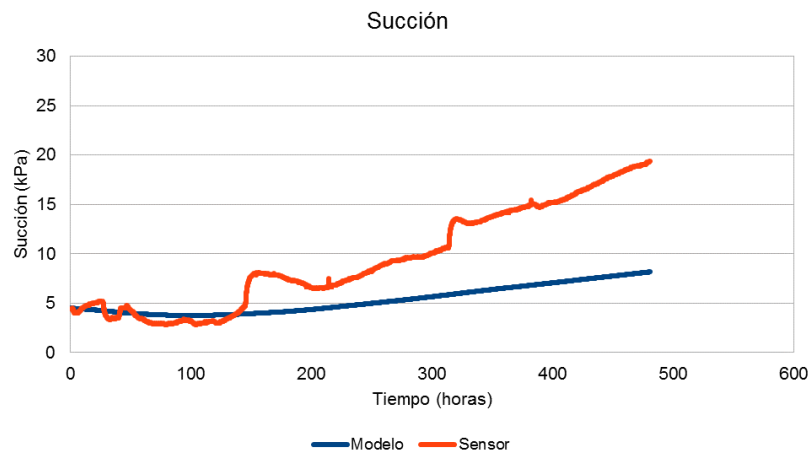
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad

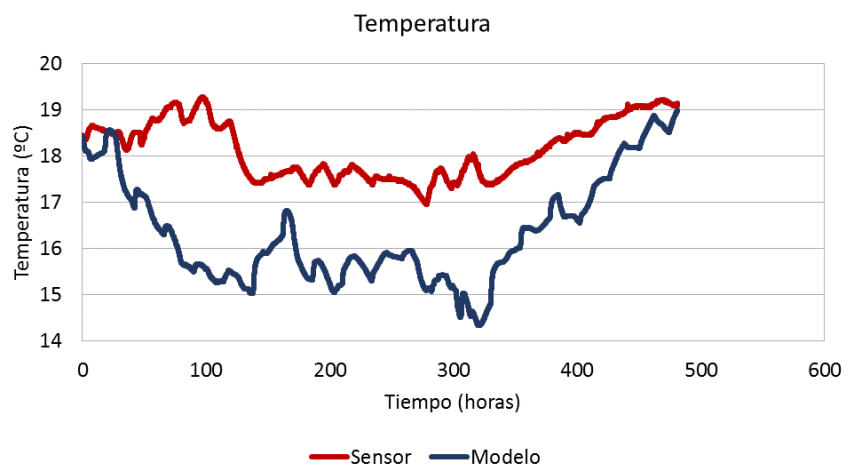


Punto situado a 0.8 metros de profundidad

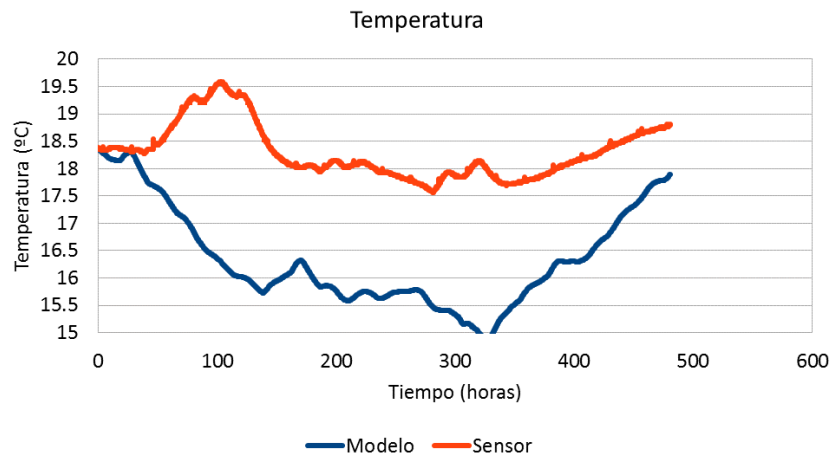


Evolución de la temperatura:

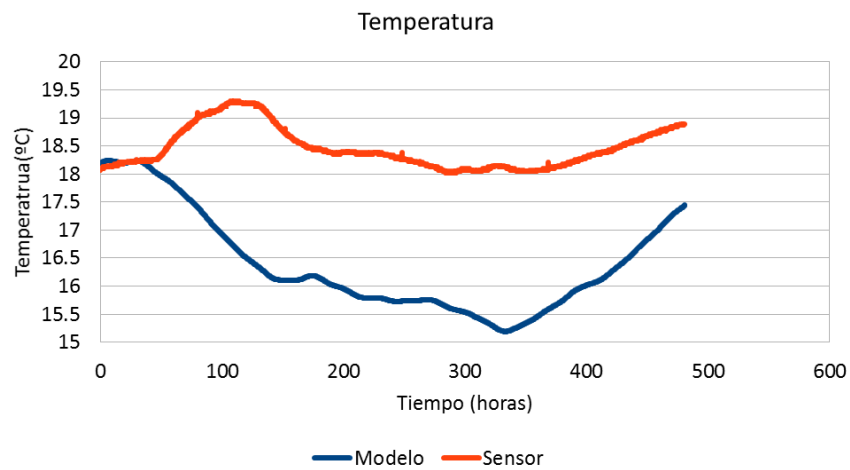
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



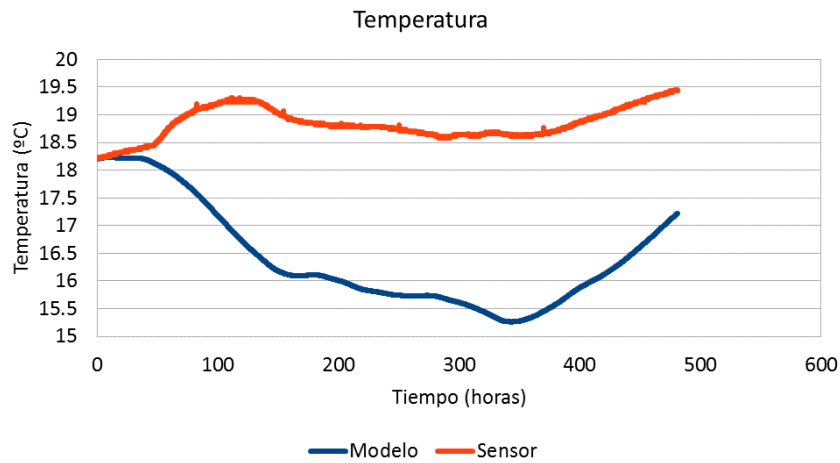
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad



Punto situado a 0.8 metros de profundidad

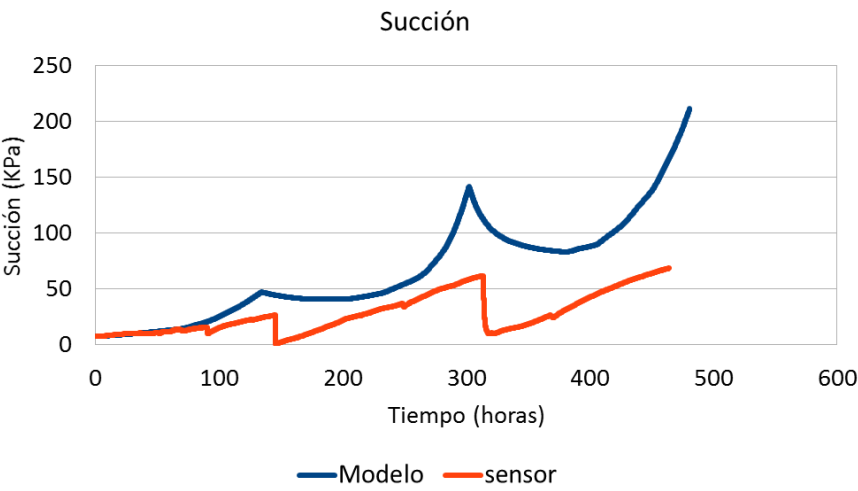


ANEJO 9: RESULTADOS CASO 9.

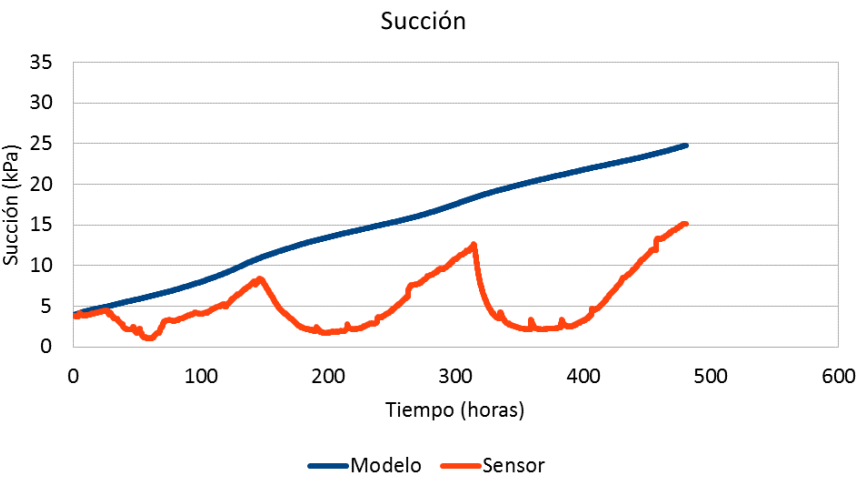
PERMEABILIDAD RELATIVA	CURVA DE RETENCIÓN		RADIACIÓN	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
10^{-16}	$P_0=0.045$	$\lambda=0.5$	CONSTANTE FACTOR 0.1	2.5-3

Evolución de la succión:

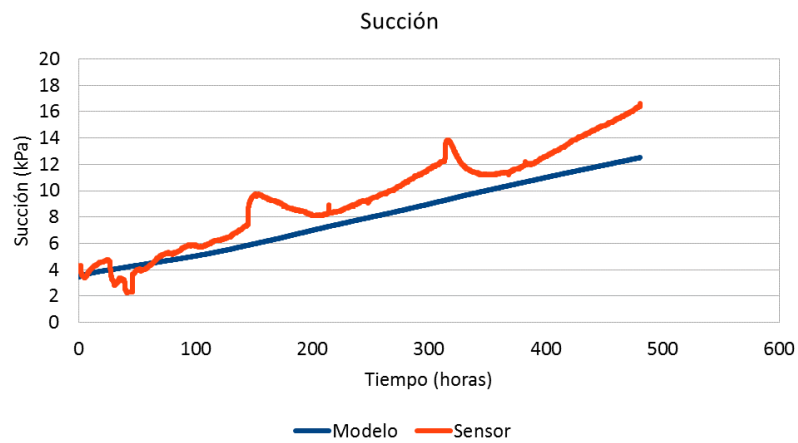
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



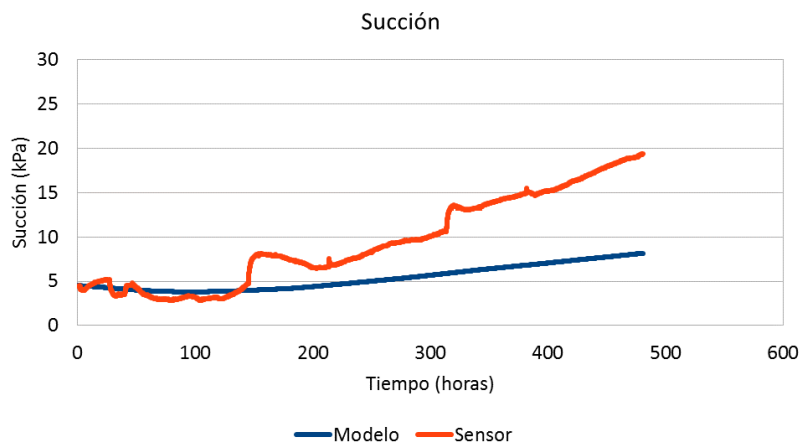
Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad

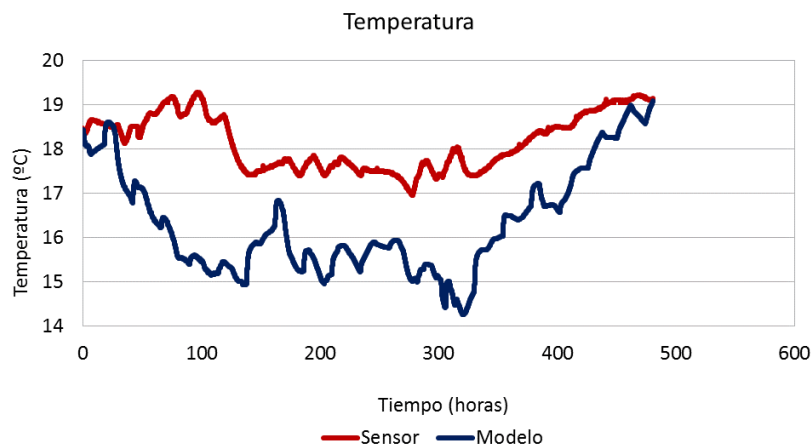


Punto situado a 0.8 metros de profundidad

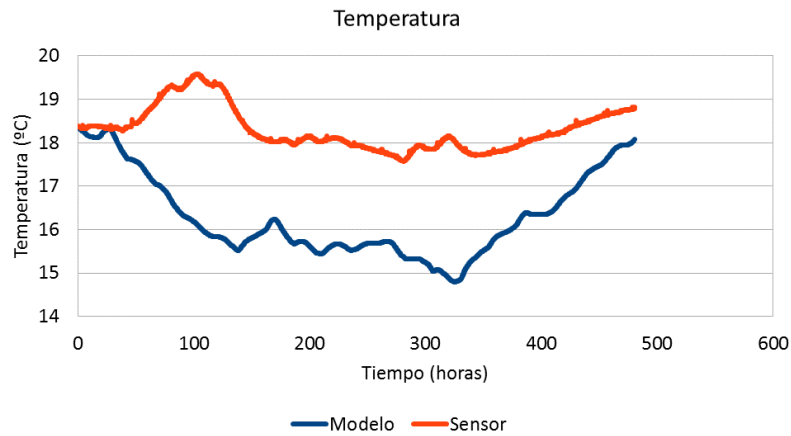


Evolución de la temperatura:

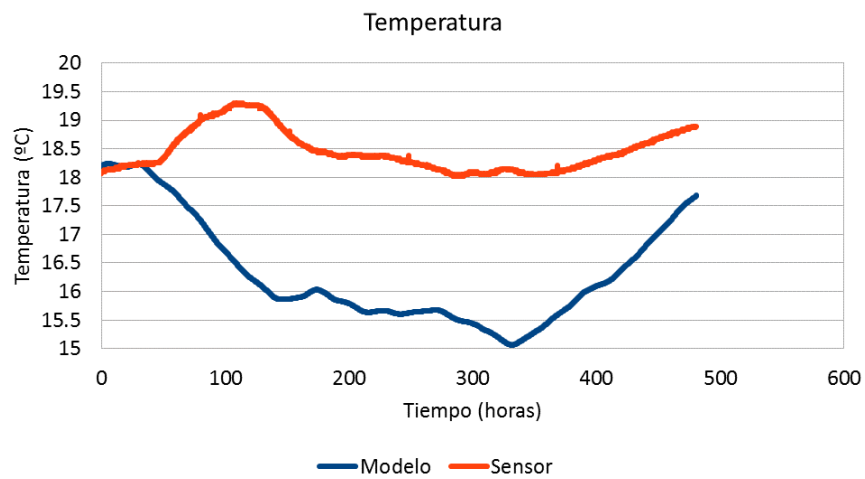
Punto situado a 0.2 metros de profundidad



Punto situado a 0.4 metros de profundidad



Punto situado a 0.6 metros de profundidad



Punto situado a 0.8 metros de profundidad

